

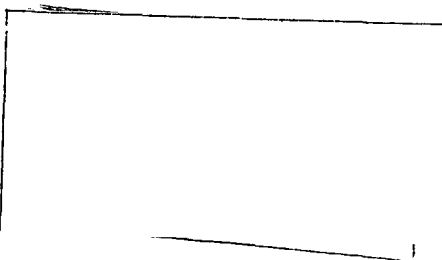
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์



นายชินวรณ์ ทรัพย์จรัสแสง
นางสาวพรรณพร เปรมปรีชากุล

๕/พ.
๗๕/ค
2536
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2536

ELECTROSTATIC PRECIPITATOR

Mr. Chinnawoot Sabjarassang

Ms. Pannapoon Premprechakul

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science
Department of Applied Physics
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1993

หัวข้อโครงการพิเศษ

เครื่องดับเพลิงด้วยไฟฟ้าสถิตย์

โดย

นายชินวัฒน์ ทรัพย์จรัสแสง

นางสาวพรรณพร เปรมปรีชากุล


ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย

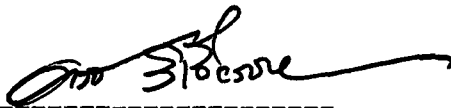
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง อนุมัติให้นำโครงการพิเศษนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์บัณฑิต



หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

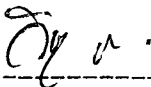
(ดร.ปรีชา เกียนสมประสงค์)

คณะกรรมการโครงการพิเศษ



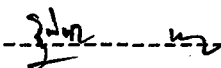
ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย)



กรรมการ

(อ.วิชาญ เตชะสิทธิ์)



กรรมการ

(อ.ฐิตินัย แก้วแดง)

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ

เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์

นักศึกษา

นายชินวัฒน์ ทรัพย์จรัสแสง

นางสาวพรรณพร เปรมปรีชากุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

ปีการศึกษา

พ.ศ. 2536

บทคัดย่อ

เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ เป็นอุปกรณ์รวบรวมอนุภาค หรืออนุที่มีขนาดเล็ก ๆ ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยใช้พลังงานไฟฟ้าช่วยในการทำงานโดยตรง เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ ที่พัฒนาขึ้นในโครงการพิเศษนี้ ได้อาศัยรูปแบบของเครื่องขนาดใหญ่ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นต้นแบบ โดยใช้เครื่องดักจับฝุ่นชนิด 2 ตอน ในส่วนแรกนั้นเป็นส่วนที่ทำให้อากาศแตกตัวเป็นประจุ และส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่ใช้รวบรวมฝุ่น อุลทหภูมิในการทำงานคืออุลทหภูมิห้องปกติ และเป็นแบบแห้ง มีระบบระบายอากาศเป็นพัดลมดูดอากาศ ชนิดแรงเหวี่ยง ทำความเร็วลมขาเข้าได้ 3 เมตรต่อวินาที และให้ความเร็วลมขาออกมากกว่า 30 เมตรต่อวินาที และเมื่อฝุ่นจับจนเต็มแผ่นรับฝุ่นแล้ว ใช้วิธีการสั่นสะเทือน ในการนำฝุ่นออกจากแผ่นรับประจุ ด้วยตัวสั่นสะเทือนความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าแก่ส่วนหน้า 2 กิโลโวลต์ และส่วนหลัง 4 กิโลโวลต์ มีประสิทธิภาพในการจับกระดาษที่มีขนาด 0.5 ตารางเซนติเมตร ประมาณ 99% , ฝุ่นซีเมนต์ผงและ ฝุ่นแป้งมันประมาณ 95 %

Special Project Title Electrostatic Precipitator

Name Mr.Chinnawoot Sabjarassang
 Ms.Pannapoon Premprechakul

Special Project Advisor Asst.Prof Dr.Aree Wichainchai

Department Applied Physics

Academic Year 1993

Abstract

Electrostatic Precipitators (ESP) are high efficiency particulate collection devices that utilize electric energy directly to assist in the removal of the particulate matter in the air. ESP, invented in this special project, is 2 sections type. The first is used for ionizing the air and particulating the matter in the second part. The running temperature is room temperature or cold type and also dry type precipitator. Centrifugal fan is used in the ventilating system, has capable to transfer gas at inlet 3 m/s and more than 30 m/s at outlet. Vibrator, used in rapping system, has frequency 50 Hz. When connect 2kV power supply to the first section and 4kV to the second. The efficiency of collection is about 99% for 0.5 cm² paper and about 95% for cement and powder dust.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลต่างๆ ดังนี้

คุณพ่อและคุณแม่	ที่ให้ความอุปการะในทุกๆ ด้านจนสำเร็จการศึกษา
พศ.ดร.อารีย์ วิเชียรมาศ	ที่ให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำโครงการพิเศษนี้
อ.วิจิต ศรีโชติ	ที่คอยให้คำปรึกษาในรายละเอียดต่างๆ
อ.พนัส อินทรพาณิชย์ และ	
คุณสุเทพ ยั้งเยี่ยม	ที่สละเวลาในช่วยเหลือและเอื้อเฟื้อสิ่งต่างๆ
คุณไชยกิจ กิจส่องแสง และ	
คุณบุญชัย พจนานสมสมาน	คอยให้คำปรึกษาทางด้านวงจร
คุณวิโรจน์ อิกธิประทีป	จัดหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้
คุณจักรกฤษณ์ จูเจริญ และ	
คุณศุภชัย สมนโนทธาน	ช่วยติดตั้งอุปกรณ์
เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทั้งในสถาบันและนอก	ที่คอยห่วงใยและให้กำลังใจ รวมทั้งคอยสอบถาม
สถาบัน	ความก้าวหน้าอยู่เสมอ
คณะกรรมการทุกท่าน	ที่ตรวจทานรายงานฉบับนี้
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์	ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ
ผู้เขียนขอแสดงความยกย่อง และ	ขอขอบคุณต่อความเมตตากรุณาต่อบุคคลเหล่านี้ด้วย
ความจริงใจอย่างที่สุด	

ชินวรณ์ ทรัพย์จรัสแสง
 พรรณพร เปรมปรีชากุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อไทย.....	ก
บทคัดย่ออังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักเกณฑ์เบื้องต้น.....	6
2.1 เครื่องดับไฟด้วยไฟฟ้าสถิตย์.....	6
2.2 ทฤษฎีการเกิดประจุด้วยไฟฟ้าสถิตย์.....	6
2.2.1 บทนำ.....	6
2.2.2 การคำนวณค่าประจุที่เกิดขึ้นบนแผ่นโลหะ.....	9
2.2.3 การประจุแบบโคโรนาให้กับอนุภาค.....	10
2.2.4 การคำนวณค่าประจุสูงสุดบนอนุภาคทรงกลมที่อยู่ใน สนามการคายประจุวงกลม.....	13
2.2.5 การคำนวณอัตราการประจุของอนุภาคทรงกลมในการ คายประจุเป็นวงกลม.....	14
2.2.6 การประจุโดยการแพร่.....	14
2.2.7 ผลการทดลองการประจุในการคายประจุเป็นวงกลม.....	16
2.2.8 ปัจจัยทางเคมีที่มีผลต่อการประจุ.....	17
2.2.9 การเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	18
2.2.10 ลมไอออน.....	19
2.3 การประยุกต์ใช้ไฟฟ้าสถิตย์เพื่อปรับปรุงสภาพของก๊าซ.....	23
2.3.1 บทนำ.....	23
2.3.2 ทฤษฎีว่าด้วยการดักจับในการไหลที่มีลักษณะเป็นชั้นๆ.....	25
2.3.3 การไหลที่มีลักษณะไม่เป็นชั้นและสมการของดอยช์.....	26
2.3.4 ความสมบูรณ์ของสมการของดอยช์.....	27
2.3.5 ผลของคุณสมบัติของฝุ่นต่อการดักจับ.....	28

2.3.6	การไอออไนเซชันย้อนกลับ.....	29
2.3.7	สภาพต้านทานไฟฟ้าของฝุ่น.....	32
2.3.8	ผลของแรงทางอากาศพลศาสตร์.....	34
2.3.9	ผลของการใส่ศักย์ไฟฟ้า.....	34
2.3.10	ผลเนื่องจากรูปแบบหรือรูปร่างลักษณะของตัวเครื่อง.....	38
2.3.11	เครื่องดักจับแบบ 2 ตอน.....	39
2.3.12	เครื่องดักจับขนาดเล็ก.....	39
2.4	ลักษณะทั่วไปของเครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์.....	41
2.4.1	หลักการของเครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์.....	48
2.4.2	ชนิดของเครื่องดักจับ.....	54
2.4.3	วิธีการปรับปรุงสภาพของก๊าซ.....	57
2.4.4	การนำฝุ่นดักจับ เรียบร้อยแล้วออกจากระบบ.....	58
2.5	หลักการเบื้องต้นของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิทชิง.....	62
2.5.1	คิซึทซึคอนเวอร์เตอร์.....	63
2.5.2	การออกแบบวงจรเรียงกระแสขาเข้า.....	71
2.5.3	การออกแบบคอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็ค.....	71
2.5.4	OUTPUT SECTION.....	75
2.5.5	วงจรควบคุมการสวิตช์ให้คงที่.....	79
2.6	หลักการเบื้องต้นของวงจร Double Villard Voltage Quadrupling Cascade.....	86
บทที่ 3	การดำเนินการวิจัย.....	89
3.1	การวิจัยและการดำเนินการในส่วนของตัวอุปกรณ์ดักจับฝุ่น.....	89
3.1.1	ขอบเขตในการดำเนินการสร้างส่วนตัวดักจับฝุ่น.....	89
3.1.2	การดำเนินการสร้างส่วนดักจับฝุ่น.....	90
3.2	การวิจัยและการดำเนินการในส่วนของแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง.....	103
3.2.1	ขอบเขตในการดำเนินการสร้างแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง.....	103
3.2.2	การดำเนินการสร้างแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง.....	104
3.2.2.1	การออกแบบส่วนขาเข้า (Input Section).....	105
3.2.2.2	การออกแบบส่วนสวิทชิง.....	105
3.2.2.3	การออกแบบส่วนขาออก (Output Section).....	110

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	113
4.1 ผลการทดลองวงจรแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง.....	113
4.2 ผลการทดลองเครื่องตัดจับแผ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์.....	117
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	120
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	
ภาคผนวก ค	
เอกสารอ้างอิง	
ประวัติผู้แต่ง	

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1	เครื่องตกตะกอนฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่..... 3
รูปที่ 2.1	แสดงการคายประจุเป็นวงกลมจากเข็มแหลมไปยังแผ่นโลหะ..... 7
รูปที่ 2.2	แสดงอนุภาคตัวนำที่เป็นทรงกลมอยู่ในสนามไฟฟ้า..... 11
รูปที่ 2.3	แสดงขีดจำกัดของประจุที่จะอยู่ในอนุภาคที่ขนาดต่างๆ ได้..... 17
รูปที่ 2.4	แสดงเส้นทางเดินของไอออนลบที่เคลื่อนที่ไปชนอนุภาคตัวนำ..... 19
รูปที่ 2.5	แสดงความเร็วของลมไอออนกับกระแสในการคายประจุเป็นวงกลม..... 23
รูปที่ 2.6	ส่วนประกอบของหัวที่เป็นวงกลมสำหรับกำเนิดลมไอออน..... 25
รูปที่ 2.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและศักย์ไฟฟ้าในการคายประจุจากจุดไปยังระนาบ..... 33
รูปที่ 2.8	อัตราการติดของฝุ่น..... 35
รูปที่ 2.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสในการคายประจุแบบจุดไปยังระนาบ..... 37
รูปที่ 2.10	รูปแบบการกำเนิดสัญญาณ..... 39
รูปที่ 2.11	MPC..... 40
รูปที่ 2.12	เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบ 2 ตอน..... 43
รูปที่ 2.13	เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ที่ใช้ในโรงงานขนาดใหญ่..... 44
รูปที่ 2.14	เครื่องดักจับฝุ่น 1 เครื่อง ที่ประกอบด้วย 2 Chambers, 12 Bus Sections, 5 แหล่งจ่ายไฟ และมีสนามไฟฟ้า 3 ค่า..... 46
รูปที่ 2.15	การจัดเรียงตัวของเครื่องดักจับ..... 47
รูปที่ 2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในเครื่องชนิด 2 ตอน..... 48
รูปที่ 2.17	ลักษณะของหัวปล่อยประจุแบบต่างๆ..... 49
รูปที่ 2.18	ภาพตัวอย่างเมื่อนำหัวปล่อยและรับประจุมารวมกัน..... 50
รูปที่ 2.19	ชนิดของหัวรับประจุ..... 51
รูปที่ 2.20	การจัดเรียงตัวของหัวรับประจุแบบต่างๆ..... 51
รูปที่ 2.21	ความสัมพันธ์ของค่าแรงดันและกระแสระหว่างหัวรับและปล่อยประจุ..... 52

	หน้า
รูปที่ 2.22	วิธีการจับอนุภาคที่มีค่าสภาพต้านทานต่ำ..... 53
รูปที่ 2.23	Buffer ที่ใช้รับประจุ..... 54
รูปที่ 2.24	ผลของอุณหภูมิและความชื้นกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฝุ่น ซีเมนต์..... 55
รูปที่ 2.25	ผลของค่าสภาพต้านทานต่อประสิทธิภาพในการจับฝุ่นซีเมนต์..... 56
รูปที่ 2.26	เครื่องดักจับฝุ่นชนิดแผ่นคู่ขนานและมีหัวปล่อยประจุอยู่ บริเวณกึ่งกลาง..... 58
รูปที่ 2.27	ผลของกัมมันตภาพรังสีต่อสภาพต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆ..... 59
รูปที่ 2.28	ค่าสภาพต้านทานของเก้าอี้สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับ ระบบ..... 61
รูปที่ 2.29	ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในการจับกับความถี่ในการให้ แรงกับระบบ..... 62
รูปที่ 2.30	ชนิดของเครื่องดักจับแบบแห้ง..... 63
รูปที่ 2.31	หลักการของเครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบ 2 ตอน..... 63
รูปที่ 2.32	เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบ 2 ตอน ของ Westinghouse Electric Corp..... 64
รูปที่ 2.33	บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิทชิง..... 65
รูปที่ 2.34	วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็ค..... 67
รูปที่ 2.35	วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แบบฟอร์เวิร์ด..... 68
รูปที่ 2.36	คอนเวอร์เตอร์แบบพัพ-พูลและรูปคลื่นสัญญาณตามจุดต่างๆ..... 69
รูปที่ 2.37	วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์..... 70
รูปที่ 2.38	กราฟแสดงผลที่เกิดจากการใส่ตัวเก็บประจุในวงจรฮาล์ฟบริดจ์..... 71
รูปที่ 2.39	วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์..... 72
รูปที่ 2.40	แสดงส่วนวงจรขาออกของแหล่งจ่ายไฟสวิทชิงแบบฟลายแบ็ค..... 79
รูปที่ 2.41	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน เมื่อไดโอด นำกระแสที่ค่าประแสต่างๆ กัน..... 80
รูปที่ 2.42	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ PWM..... 81
รูปที่ 2.43	รูปแสดงหลักการและสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ ของ PWM..... 84
รูปที่ 2.44	รูปแสดงวงจรภายในของ IC TL494..... 85
รูปที่ 2.45	รูปคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ ของ IC TL494..... 85

รูปที่ 2.46	แสดงวงจรทวิแรงดันแบบ Double Villard Voltage Quadrupling Cascade.....	87
รูปที่ 3.1	แสดงงานเขียนแบบและอัตราส่วนของหอรบรวมฝุ่น.....	91
รูปที่ 3.2	แสดงหม้อเก็บฝุ่น.....	92
รูปที่ 3.3	หอรบรวมฝุ่นที่ได้ทำการสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว.....	93
รูปที่ 3.4	ส่วนต่อทางเดินอากาศและระบบระบายอากาศ.....	94
รูปที่ 3.5	แสดงงานเขียนแบบส่วนปล่อยประจุส่วนที่ 1.....	95
รูปที่ 3.6	แสดงเส้นลวดปล่อยประจุและแผ่นรับประจุบริเวณส่วนหน้า.....	96
รูปที่ 3.7	ส่วนปล่อยประจุส่วนที่ 1 เมื่อทำการสร้างเสร็จแล้ว.....	97
รูปที่ 3.8	แสดงงานเขียนแบบของเหล็กที่ใช้ในส่วนที่ 2.....	97
รูปที่ 3.9	แสดงงานเขียนแบบของแผ่นจับฝุ่นที่ใช้ในส่วนที่ 2.....	98
รูปที่ 3.10	แสดงงานเขียนแบบเมื่อทำการประกอบแผ่นจับฝุ่นเข้ากับโครงเหล็กแล้ว....	99
รูปที่ 3.11	แสดงงานเขียนแบบของอุปกรณ์ที่ใช้แยกแผ่นจับฝุ่นแต่ละประเภท.....	100
รูปที่ 3.12	แสดงระบบให้แรงดันสั่นสะเทือน.....	101
รูปที่ 3.13	ชุดดักจับฝุ่นส่วนที่ 2 เมื่อประกอบเรียบร้อยแล้ว.....	101
รูปที่ 3.14	สปริงพ่อนแรง.....	102
รูปที่ 3.15	รูปแสดงเมื่อประกอบส่วนต่างๆ เข้ากับระบบ.....	102
รูปที่ 3.16	แสดงวงจรส่วนขาเข้า.....	105
รูปที่ 3.17	แสดงการต่อวงจรควบคุมของ IC TL494.....	110
รูปที่ 3.18	แสดงวงจรขาออก.....	111
รูปที่ 3.19	แหล่งจ่ายไฟของเครื่องดักจับฝุ่น.....	112

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 2.1	ตารางแสดงค่าความเร็วลมและกระแสของการคายประจุ เป็นแบบวงกลม ระหว่างขั้วที่เป็นจุดและเป็นระนาบระยะห่าง 4 เซนติเมตร มีค่าสนามเฉลี่ย 5.5 กิโลโวลท์ต่อเซนติเมตร.....	22
ตาราง 3.1	แสดงการเปรียบเทียบชนิดของแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงชนิดต่างๆ.....	103
ตาราง 3.2	แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของหลอดทองแดงที่ใช้สำหรับพินหม้อแปลง.....	107
ตาราง 4.1	ค่าความต้านทานและแรงดันป้อนกลับที่รอบการทำงานต่างๆ.....	113
ตาราง 4.2	ค่าแรงดันที่ได้ที่ค่ารอบการทำงานต่างๆ.....	114
ตาราง 4.3	ค่าแรงดันขาออกที่ค่ารอบการทำงานต่างๆ เมื่อมีโหลดเป็นส่วนปล่อยประจุ	115
ตาราง 4.4	ค่าแรงดันขาออกที่ค่ารอบการทำงานต่างๆ เมื่อมีโหลดเป็นส่วนรับประจุ..	116
ตาราง 4.5	ปริมาณสารตัวอย่างชนิดต่างๆ ที่จับได้จากเครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์.	117
ตาราง 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ให้กับส่วนที่ 1 และ 2 ..	119

บทที่ 1

บทนำ

เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์

ในปัจจุบัน ความเจริญทางด้านต่างๆ ได้เกิดขึ้นอย่างมากมาย ไม่ว่าจะเป็นสาขาใดๆ ก็ตาม ความเจริญต่างๆ นั้นเป็นเสมือนดาบสองคม มีคุณอนันต์และโทษมหันต์ โทษที่เป็นผลกระทบที่สำคัญอย่างมากในปัจจุบัน ก็คือ ผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นมลภาวะทางด้านน้ำ, เสียง อากาศ ฯลฯ ซึ่งส่งผลให้คุณภาพชีวิตของมนุษย์ต่ำลง จึงได้มีการพัฒนาวิธีการต่างๆ เพื่อที่จะจัดการกับสิ่งอันเป็นอันตรายต่อมนุษย์เหล่านี้ ตั้งแต่วิธีการง่ายๆ ขึ้นพื้นฐาน เรื่อยมาจนกระทั่งขั้นสูง ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในกลุ่มประเทศอุตสาหกรรม ซึ่งเผชิญหน้ากับปัญหาเหล่านี้มาเป็นเวลานานแล้ว ส่วนในด้านของประเทศไทย หรือประเทศที่กำลังก้าวเข้าสู่ยุคที่กำลังจะเปลี่ยนเป็นประเทศอุตสาหกรรม ซึ่งอาจจะเพิ่งเริ่มประสบปัญหาเหล่านี้ โดยอาจจะเป็นเพียงระยะเริ่มต้น ทำให้เกิดการละเลย หรือเพิกเฉยเสีย ซึ่งอาจจะเป็นเพราะยังไม่ประสบผลอันรุนแรง หรือไม่มีความรู้มากเพียงพอที่จะจัดการกับปัญหาเหล่านี้ แต่ปัจจุบันได้เข้าสู่ยุคการสื่อสารที่ไร้พรมแดน ทำให้ประเทศเหล่านี้รู้ถึงผลอันอาจจะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากผลเหล่านี้ได้ การศึกษาเกี่ยวกับการขจัดมลภาวะเหล่านี้ จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง อันเป็นที่มาของโครงการพิเศษนี้ ซึ่งจะเป็นเรื่องการนำความรู้พื้นฐานทางฟิสิกส์อย่างง่ายๆ มาจัดการกับมลภาวะทางอากาศ ที่เกิดขึ้นในห้องพักอาศัย, ห้องทดลอง หรือใช้แก้ปัญหาให้กับโรงงานอุตสาหกรรมได้อีกด้วย

การใช้แรงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์เพื่อรวบรวมกลุ่มควัน เกิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1824 โดย โฮล์เฟล (Hohlfeld) ในประเทศเยอรมันนี้ แต่ก็ไม่ได้มีการศึกษาอย่างจริงจัง จนกระทั่ง ค.ศ. 1880 โอลิเวอร์ ลอดจ์ (Oliver Lodge) ได้จดลิขสิทธิ์เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ สำหรับรวบรวมฝุ่น ที่เกิดจากการถลุงแร่ขึ้นเป็นคนแรก แต่เครื่องต้นแบบในยุคแรกๆ ก็ไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร เนื่องจากไม่มีแหล่งจ่ายไฟที่มีค่าสูงเพียงพอจนกระทั่งสำเร็จสมบูรณ์เครื่องแรกในปี ค.ศ. 1907

เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ เป็นอุปกรณ์รวบรวม ฝุ่น, อนุ หรือ อนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก มีประสิทธิภาพสูง โดยใช้พลังงานไฟฟ้าช่วยในการแยกฝุ่นโดยตรง เครื่องดักจับฝุ่นที่ได้พัฒนาขึ้นในโครงการพิเศษนี้ ได้อาศัยรูปแบบเครื่องดักจับฝุ่น ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เป็นต้นแบบ แต่ได้ทำการปรับปรุงขนาด และวิธีการให้เหมาะสมกับระยะเวลา และความสามารถรวมทั้งค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการดำเนินการสร้าง มีขีดความสามารถในการปรับปรุงสภาพก๊าซ 2.7 ลูกบาศก์

เมตรต่อวินาที โดยออกแบบให้เป็นเครื่องดักจับฝุ่นชนิด 2 ตอน (2 Sections Type) ในตอนแรกจะเป็นส่วนที่ทำให้อากาศแตกตัว (Ionize) เป็นไอออน ซึ่งไอออนเหล่านี้จะไปประทะกับอนุภาคของฝุ่น แล้วเกิดการถ่ายเทประจุให้กับอนุภาคของฝุ่น จากนั้นจะลอยไปในทางเดินของอากาศไปยังส่วนที่ 2 ซึ่งจะเป็นส่วนที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ เพื่อที่จะให้ฝุ่นที่มีประจุไปเกาะติด เกิดการถ่ายเทประจุจากอนุภาค สู่แผ่นรวบรวมฝุ่น ทำให้ฝุ่นติดแน่นอยู่กับส่วนรวบรวมฝุ่นในส่วนที่ 2 ใ้ในส่วนของหอรวบรวมฝุ่น (Chamber) นี้ยังประกอบไปด้วย ระบบระบายอากาศ (Ventilating System) ซึ่งใช้พัดลมระบายอากาศชนิดแรงเหวี่ยง หรือแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Fan) ซึ่งเมื่อนำไปติดตั้งร่วมกับหอรวบรวมฝุ่นแล้ว สามารถทำความเร็วลมขาเข้าได้ 3 เมตรต่อวินาที และความเร็วลมขาออกมากกว่า 30 เมตรต่อวินาที นอกจากระบบระบายอากาศแล้ว ยังมีอุปกรณ์ให้แรงสั่นสะเทือนแก่ส่วนรวบรวมฝุ่น เพื่อทำให้ฝุ่นที่เกาะติดอยู่กับขั้วรวบรวมฝุ่น (Collection Electrode) สามารถหลุดออกได้เมื่อได้รับแรงสั่น โดยใช้ตัวสั่น (Vibrator) ชนิดแม่เหล็กไฟฟ้าสั่นด้วยความถี่ 50 เฮิรตซ์

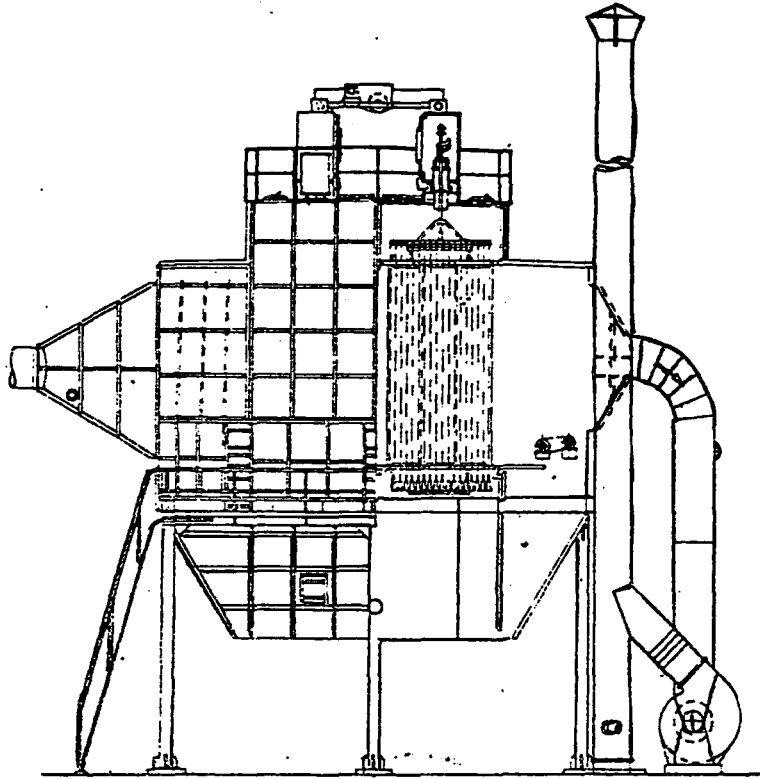
ส่วนแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงที่ใช้กับระบบ ใช้แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง ผสมกับวงจรทวีแรงดัน เพื่อผลิตแรงดันไฟฟ้าให้ได้สูงมากพอ ที่จะทำให้สามารถดักจับฝุ่นที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ได้

ประสิทธิภาพในการจับฝุ่นที่ได้ เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าแก่ส่วนปล่อยประจุ หรือส่วนหน้า 2 กิโลโวลต์ และส่วนหลัง 4 กิโลโวลต์เมื่อใช้กระดาษขนาด 0.5 ตารางเซนติเมตรแทนอนุภาคของฝุ่น คือ 99% และ 95% เมื่อใช้ซีเมนต์ชนิดผงและแป้งมันแทนอนุภาคของฝุ่น

คณะผู้วิจัย ซึ่งได้สนใจศึกษาและสร้างชุดดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อผู้ที่ทำงานในโรงงานอุตสาหกรรม ที่มีปริมาณฝุ่นมากหรือปริมาณฝุ่นที่ออกมา จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพแวดล้อม ดังจะเห็นได้จากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นที่เหมืองแม่เมาะ เป็นต้น

อาจสรุปข้อดีข้อเสียของเครื่องคักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ได้เป็นดังนี้

ข้อดี	ข้อเสีย
<p>1) ประสิทธิภาพในการจับสูง คืออยู่ในช่วง 80-99.9% ในขนาดฝุ่น 0.01 ไมโครเมตร</p> <p>2) ค่าใช้จ่ายในการทำงานต่ำ</p> <p>3) ความดันที่ลดลงต่ำมาก อยู่ในราว 10-25 มิลลิเมตรปรอท</p> <p>4) การทนต่ออัตราการไหลของอากาศสูง ถึง 2,000,000 cfm ก็ยังสามารถทำงานได้</p> <p>5) ความดันก๊าซสามารถมีค่าได้ถึง 150 psi หรือต่ำขนาดสูญญากาศก็ทำงานได้</p> <p>6) ความหนาแน่นของอนุภาค มีค่าได้ตั้งแต่ 0.001-1000 อนุ ต่อกบกกาศเมตร</p> <p>7) สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 650 C</p> <p>8) ระยะเวลาในการทำงานน้อยมาก อยู่ใน ช่วง 0.1-10 วินาที</p> <p>9) ความเร็วในการถ่ายเทก๊าซสูงถึง 0.01 -2 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที</p> <p>10) สะดวกในการทำความสะดวกฝุ่นออก</p>	<p>1) ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งค่อนข้างสูง</p> <p>2) ความต้องการพื้นที่ ในการติดตั้งสูง</p> <p>3) อันตรายอันเนื่องมาจากการระเบิด เมื่อก๊าซที่ผ่านเข้ามา สามารถติดไฟได้</p> <p>4) การเกิดก๊าซไอโซน ซึ่งเป็นก๊าซอันตรายต่อมนุษย์ ซึ่งเกิดได้จากขั้วปล่อยประจุระหว่าง การออไนซ์ของก๊าซ</p> <p>5) วิธีการทำงาน ซึ่งค่อนข้างจะซับซ้อนและต้องใช้ความระมัดระวังสูง ในเรื่องของการหมุน เวียนก๊าซที่เหมาะสม</p>



รูปที่ 1.1 เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ⁵

วัตถุประสงค์ในการทำโครงการพิเศษ

- 1) เพื่อศึกษาการดับจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์
- 2) เพื่อศึกษาแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงในการทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซ
- 3) เพื่อนำเครื่องต้นแบบไปทดลองใช้ในอาคารจริงได้

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาลักษณะการแตกตัวของอากาศ และประโยชน์ทางการจับอนุภาค
- 2) ศึกษาและคัดเลือกแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงที่เหมาะสม
- 3) ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่จะนำมาประกอบในโครงการ
- 4) ทดลองออกแบบโครงสร้างของตัวดูดฝุ่นที่เหมาะสมกับพื้นที่
- 5) ออกแบบและทดลองหาขนาดของแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ ที่เหมาะสมกับเครื่องดูดฝุ่นโดยอาศัยผลการทดลอง
- 6) ทดสอบระบบโดยรวม รวมทั้งประสิทธิภาพการดูดจับของตัวเครื่อง

ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการพิเศษ

- 1) สามารถเข้าใจปรากฏการณ์พื้นฐานทางฟิสิกส์ของอากาศ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ได้
- 2) เข้าใจหลักการทำงานของแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงหลายๆ แบบ
- 3) เข้าใจถึงปัญหาและหนทางแก้ไขปัญหาในการทำโครงการพิเศษได้
- 4) มีประสบการณ์ในการค้นคว้าหาข้อมูล, อุปกรณ์ และวิธีการ ที่จำเป็นในการทำโครงการ
- 5) สามารถใช้เครื่องมือวัดทางฟิสิกส์ และการประเมินค่าทางสถิติในการทดลองจริงได้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เครื่องจักรจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์

ก่อนที่จะเข้าสู่ หลักการและการทำงาน จะขอกล่าวถึงทฤษฎีการแตกตัวของอากาศ เสียก่อน ซึ่งเป็นเรื่องที่สำคัญ อันเป็นหัวใจในการทำงานของเครื่องจักรจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจวิธีการทำงานของเครื่องได้เป็นอย่างดี รวมทั้งสามารถกำหนดแบบ, ขนาด และ ลักษณะอันเหมาะสมกับความต้องการได้ และในครั้งหลังจะเป็นทฤษฎีแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงแบบต่างๆที่ใช้ในโครงการนี้

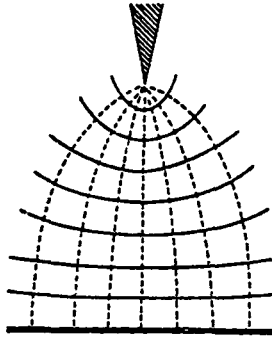
2.2 ทฤษฎีการเกิดประจุด้วยไฟฟ้าสถิตย์

2.2.1 บทนำ

การเกิดประจุ โดยการเสียดสีกันระหว่างวัตถุสองชนิด เราไม่สามารถที่จะควบคุมค่าประจุที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากการเกิดจะเปลี่ยนไปตามสภาพวัตถุ, สภาพอากาศ ฯลฯ แต่เมื่อทำการประจุบนพื้นผิวที่กำหนดทิศทางที่แน่นอน จะทำให้เกิดการคายประจุเป็นรูปร่างกลม (Corona Discharge) ซึ่งผลที่ได้คือ จะทำให้เกิดไอออนซึ่งมีขั้วเดียวกันหมดกระจายอยู่ทั่วไปบริเวณพื้นผิว ซึ่งสามารถที่จะควบคุมอัตราการเกิดประจุได้จาก ค่าพื้นผิวกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป

การคายประจุเป็นวงกลม (Corona Discharge) จะเกิดขึ้น เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงมากระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว ซึ่งขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งจะเป็นผิวโค้งที่มีรัศมีเล็กๆ ส่วนอีกขั้วหนึ่งจะมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ และสนามไฟฟ้านี้ก่อให้เกิดการคายประจุไฟฟ้าในขอบเขตที่จำกัดใกล้กับขั้วไฟฟ้าที่มีผิวโค้ง บริเวณที่มีลักษณะคล้ายกับเข็มแหลมๆ ที่ค่าแรงดันที่สูงกว่าแรงดันพังของอากาศ ระหว่างขั้วทั้งสอง รูปที่ 2.1 แสดงถึงการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา

ในบริเวณที่ใกล้ๆ กับขั้วไฟฟ้าที่เป็นแท่งแหลมนั้น สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงเกินกว่าสนามไฟฟ้าพังของก๊าซ (Breakdown Field) มาก อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณนี้ จะถูกเร่งไปชนกับอะตอม และอะตอมจะปลดปล่อยอิเล็กตรอน ทำให้มันกลายเป็นไอออนบวก ส่วนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นนั้น ก็จะถูกเร่งให้เกิด คู่อิเล็กตรอนและไอออนบวกเช่นนี้เพิ่มขึ้นอีก ผลสุดท้าย ก็คือ ทำให้



รูปที่ 2.1 แสดงการคายประจุเป็นวงกลมจากเข็มแหลมไปยังแผ่นโลหะ ; เส้นไข่³
 ปลายทนต์เส้นแรงสนามไฟฟ้า เส้นทึบไข่แสดงบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน

เกิดอิเล็กตรอนขึ้นจำนวนมากมาช โดยจะทำให้เกิดแสงขึ้นในชบวนการไอออไนเซชันซึ่งมีลักษณะเป็นแสงเรืองที่สามารถมองเห็นได้รอบๆ ขั้วไฟฟ้าผิวโค้งเล็กมากนี้ ซึ่งจะเรียกการคายประจุนี้ว่าปรากฏการณ์โคโรนา (Corona) หรือ การคายประจุเป็นวงกลม ซึ่งจะใช้คำนี้อ้างอิงตลอดในโครงการพิเศษนี้

เนื่องจาก ไอออนบวกและอิเล็กตรอน มีคุณสมบัติที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิง พฤติกรรมของการคายประจุจะขึ้นกับ ความเป็นขั้ว (Polarity) ของขั้วไฟฟ้าแหลม เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่เป็นลบสูงมากถูกจ่ายไปที่ขั้วไฟฟ้านี้ จะเกิดไอออนลบขึ้นในช่องว่างอากาศระหว่างขั้วทั้งสอง ซึ่งจะเคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณที่มีสนามซึ่งแรงมาก และแยกตัวออกเป็น อะตอมที่เป็นกลางและอิเล็กตรอนอิสระ อิเล็กตรอนอิสระนี้จะถูกเร่งให้ห่างออกไปจากจุดที่เป็นลบ โดยสนามไฟฟ้าค่าสูงมากที่เกิดขึ้นเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าสูงที่ป้อนให้กับขั้วทั้งสอง สำหรับอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานสูงมากพอที่จะทำการไอออไนซ์อะตอมใดก็ตามที่ มาชนหรือมันไปชน จะทำให้เกิดกระบวนการทวีคูณอิเล็กตรอน (The Electron Multiplication) นี้ อย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งอิเล็กตรอนตัวใหม่ถูกเร่งห่างออกไปถึงจุดที่มันไม่สามารถรับพลังงานค่าที่เหมาะสมจากสนามไฟฟ้าระหว่างการชน เพื่อที่จะทำการไอออไนซ์อะตอมต่อไปได้อีก อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานสูงมากพอ (หมายถึงบางตัวที่มีโอกาสไปถึงจุดนี้ได้) จากสนามไฟฟ้าจะชนกับขั้วไฟฟ้า และจะปล่อยอิเล็กตรอนอันดับสอง (Secondary Electron) ซึ่งจะรวมกับการคายประจุจากขั้ว นั่นคือ จะเกิดการไอออไนเซชันแบบแสงขึ้น (Photo-ionisation)

ในอากาศ (หรือก๊าซใดๆ ที่ประกอบไปด้วย อิเล็กโตรเนกาทีฟอะตอม (Electronegative Atom) เช่น ออกซิเจนหรือฟลูออรีน) อิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิด คู่

อิเล็กตรอนและไอออนบวก จะไปชนกับอะตอมที่เป็นกลาง ทำให้เกิดไอออนที่เป็นลบขึ้นมา ซึ่งไอออนเหล่านี้ (หรืออิเล็กตรอนในก๊าซที่ไม่มีการชนเกิดขึ้น) จะทำให้เกิดค่ากระแสจำนวนมาก ภายนอกบริเวณที่เกิดการไอออไนเซชัน

เมื่อหัวไฟฟ้าแหลมถูกทำให้มีศักย์เป็นบวก อิเล็กตรอนซึ่งถูกไอออไนซ์ ในบริเวณที่มีค่าสนามแรงมากจะถูกดึงดูดเข้าไปที่จุดนี้ ส่วนไอออนบวกก็จะเคลื่อนที่ไปยังแผ่นโลหะ โดยไอออนบวกที่วิ่งอยู่ก็จะไปชนกับโมเลกุลที่เป็นกลาง และสูญเสียพลังงานให้กับมัน แต่จะไม่เกิดการไอออไนซ์ จากนั้นก็จะวิ่งไปถึงขั้วลบ ซึ่งตอนนั้นก็จะมีพลังงานในตัวค่อนข้างต่ำ และไม่สามารถทำให้เกิดอิเล็กตรอนอันดับสองได้ ส่วนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ไอออไนซ์ก็จะเคลื่อนที่ไปยังหัวบวก ทำให้เกิดการแตกตัวของอิเล็กตรอนและไอออนจำนวนมากในก๊าซด้วย การใช้การคายประจุเป็นวงกลมแบบศักย์บวกนี้ อิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาจากขั้วที่แหลมครั้งที่ 2 จะมีความสำคัญน้อยกว่าแบบศักย์ลบ แต่ไฟตอนจากการเรืองแสงอาจจะทำให้เกิดการไอออไนเซชันในก๊าซ หรือ เกิดการปลดปล่อยทางแสงจากหัวไฟฟ้าได้ และกระแสที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ว่าง ภายนอกบริเวณการไอออไนซ์ก็จะเกิดโดยไอออนที่มีหัวเดียวกับขั้วที่แหลมนั้น

เมื่อให้ค่าศักย์ที่เป็นบวกกับหัวแหลมที่เป็นเส้นลวด ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น คือ อิเล็กตรอนจะกระจายอยู่ทั่วไปตามเส้นลวด มีลักษณะคล้ายหมอกหุ้มเส้นลวดอยู่โดยเป็นเสมือนฝักดาบหุ้มอยู่ตลอดเส้นลวด เมื่อใช้ศักย์ที่มีค่าเป็นลบ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การคายประจุเป็นวงกลมนี้มีลักษณะเป็นปุกกลมๆ เป็นจุดๆ ตลอดเส้นลวด โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของการเรืองแสงจะเพิ่มขึ้น เมื่อให้ค่าศักย์เพิ่มขึ้น

การคายประจุทั้งบวกและลบในช่องว่างระหว่างหัวไฟฟ้าทั้งสอง จะเป็นการเคลื่อนที่ของไอออนที่มีหัวเดียวกับหัวแหลม ทำให้เกิดการชนกับโมเลกุลที่เป็นกลางบ่อยครั้งขึ้น โดยขึ้นกับขนาดของไอออน ผลที่เกิดขึ้นคือเกิดการถ่ายเทโมเมนตัมจากตัวไอออนไปสู่ตัวโมเลกุลทำให้ก๊าซเคลื่อนที่อย่างมากมาชนในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า ลมไอออน (Ion Wind) ซึ่งจะเป็นประโยชน์มากใน เครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ (ซึ่งจะได้กล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป) โดยเกิดขึ้นจากไอออนจำนวนมาก และเกิดกำลังขึ้นโดยได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า แต่ลมนี้ไม่ใช่มีเพียงเฉพาะไอออนเท่านั้นที่เคลื่อนที่ แต่จะรวมถึงการเคลื่อนที่ของก๊าซด้วยความเร็วของลมไอออนนี้จะอยู่ที่ค่า 1 เมตรต่อวินาที

ไอออนที่เกิดขึ้นในการคายประจุแบบวงกลม จะขยายสนามไฟฟ้าระหว่างหัวทั้งสอง โดยจะทำให้ค่าสนามใกล้เคียง หัวที่เป็นลวดมีค่าลดลงแต่จะเพิ่มค่าสนามที่อยู่ใกล้กับแผ่นโลหะ ผลก็คือ สนามที่ถูกเปลี่ยนแปลงโดยไอออนนี้จะไม่สม่ำเสมอ แต่สนามไฟฟ้าที่อยู่บริเวณที่ว่างระหว่างหัวอาจถือได้ว่ามีค่าสม่ำเสมอได้ซึ่งสามารถประมาณค่าอย่างหยาบๆ ด้วยค่า V/X และ $V/2X$ เมื่อ X คือ ระยะห่างระหว่างหัวทั้งสอง และ V คือ ค่าความต่างศักย์ที่ให้กับหัวทั้งสอง

การคายประจุเป็นวงกลม ส่วนใหญ่จะอธิบายโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้า ซึ่งการใช้ศักย์บวกหรือลบจะให้ความแตกต่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ข้อแตกต่างที่สำคัญอย่างหนึ่ง ก็คือ ถ้าใช้ศักย์บวกจะทำให้เกิดประกายไฟได้ง่ายกว่าเมื่อใช้ค่าศักย์ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ศักย์ลบ ซึ่งในทางปฏิบัติ ถ้าเลือกได้ปกติจึงนิยมใช้ค่าศักย์ทางด้านขั้วลบมากกว่าจะใช้ค่าด้านขั้วบวก

ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จะทำให้เริ่มเกิดการคายประจุเป็นวงกลมนี้ (เรียกว่า Corona Inception Voltage) ค่อนข้างจะละเอียดมาก คือ ค่าที่เมื่อกระแสเพิ่มขึ้นทันทีทันใดจากค่าที่สามารถตัดทิ้งได้ไปอยู่ที่ระดับ 1 ไมโครแอมป์ โดยมีความสัมพันธ์เป็น

$$I = KV(V-V_0) \quad (2.2.1)$$

เมื่อ V_0 คือ ค่าศักย์เริ่มต้นที่จะทำให้เกิดการคายประจุเป็นวงกลม, K คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของตัวเครื่องซึ่งใช้ได้ทั้งกับเป็นจุด, เป็นแผ่น หรือเป็นทรงกลม

โดยสรุปการคายประจุเป็นวงกลมอาจอธิบายอย่างง่าย ๆ ได้ว่า ประกอบด้วยค่าสนามไฟฟ้าแรงสูงที่ทำให้เกิดการไอออนไนเซชันของก๊าซ ใกล้กับจุดที่ปล่อยประจุ ซึ่งประจุที่เกิดขึ้นเป็นได้ทั้งชนิดไอออนบวกและลบ

2.2.2 การคำนวณค่าประจุที่เกิดขึ้นบนแผ่นโลหะ

ไอออนที่เกิดจากการคายประจุเป็นวงกลมนี้ สามารถที่จะนำไปประจุแผ่นผิวระนาบได้ สำหรับแผ่นที่เป็นฉนวนและถูกแบ่งแยกออกจากกัน ความหนาแน่นประจุจะถูกจำกัดโดยค่าการไอออไนซ์ของอากาศ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อค่าสนามที่ผิวมีค่าประมาณ 3×10^5 โวลต์ต่อเมตร ค่าสนามพัง (Breakdown Field) นี้จะใช้สัญลักษณ์ E_b ค่าสนามไฟฟ้า E ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวจะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นประจุ โดยใช้กฎของเกาส์

ความหนาแน่นประจุบริเวณพื้นผิว จะสอดคล้องกับค่าสนามพัง ดังนั้น

$$\begin{aligned} Q_s &= \epsilon_0 E_b \\ &= 2.64 \times 10^{-5} \text{ คุลอมบ์ต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

สนามของการคายประจุเป็นวงกลม ที่บริเวณหัวที่เป็นแผ่นนั้นปกติจะมีค่าเท่ากับ 3×10^5 โวลต์ต่อ

เมตร นั่นคือเมื่อแทนค่าแล้วความหนาแน่นประจุที่ผิวนั้นจะมีค่าเพียง 2.6×10^{-6} คูอมปต่อตาราง เมตร ซึ่งเพียงพอที่จะขับไอออนให้เคลื่อนที่ต่อไปได้

ค่าความหนาแน่นประจุที่ผิวที่มากที่สุดจะเพิ่มขึ้นได้ โดยการใส่แผ่นที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ หลังแผ่นที่เป็นฉนวนอีกทีหนึ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดประจุขึ้นในแผ่นที่เป็นโลหะ และจะไปลดค่าสนามที่เกิดขึ้นที่ผิวลง เมื่อใช้แผ่นที่มีฉนวนที่บางๆ เคลือบอยู่ ซึ่งก็จะทำให้แยกได้ ยกเว้นแผ่นที่เป็นโลหะ ทำให้เกิดการแยกประจุออกเป็น 2 ส่วน เป็นเสมือนคู่ขนบึงมีแกนวิซอยู่ตรงกลาง และทำให้สนามที่ผิวลดลงจนเป็นศูนย์ สู่ประจุที่ผิว และประจุเสมือนที่เกิดขึ้นอาจจะถือเป็นตัวเก็บประจุ ซึ่งสนามไฟฟ้าทั้งหมดจะอยู่ระหว่างแผ่นโลหะนั้น แต่ในความเป็นจริงแล้ว จะเกิดค่าสนามไฟฟ้าน้อยๆ ที่บริเวณผิว เนื่องจากไม่ได้เป็นตัวเก็บประจุที่สมบูรณ์แบบจริงๆ

เมื่อค่าสนามไฟฟ้าที่อยู่เหนือผิวโลหะมีค่าต่ำ ค่าประจุจะถูกจำกัดโดยการรั่วไหลแทนที่จะเป็นการดึงของแรงดันของอากาศ การประมาณค่าศักย์บริเวณพื้นผิว (V_p) จะทำได้ ถ้าทราบความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้าของการคายประจุเป็นวงกลม เมื่อมีการเคลือบฉนวนบางๆ ที่แผ่นโลหะ โดยกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้น (ข้ามฉนวน) มีค่าเป็น

$$I_1 = V_p / R \tag{2.2.2}$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานระหว่างผิวโลหะและกราวด์ (สำหรับวัสดุที่เป็นฉนวนจะไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม และ R จะขึ้นอยู่กั V_p)

ขณะที่เกิดประจุขึ้นจากการคายประจุเป็นวงกลมบนพื้นผิว V_p จะเพิ่มขึ้นและกระแสรั่วไหล I_1 ก็เพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามขณะที่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ระหว่าง ขั้วที่เกิดการโคโรนาและพื้นผิวโลหะ จะมีค่าลดลง กระแสที่เกิดจากประจุ I_c ก็จะลดลง เมื่อกระแสรั่วไหลมีค่าเท่ากับค่ากระแสที่เกิดจากประจุ ก็จะถึงขีดจำกัดของการประจุบนแผ่นโลหะได้

กระแสโคโรนาจะมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วที่ปล่อยประจุกับแผ่นโลหะ $V - V_p$ คือ

$$I_c = K(V - V_p)(V - V_p - V_0)$$

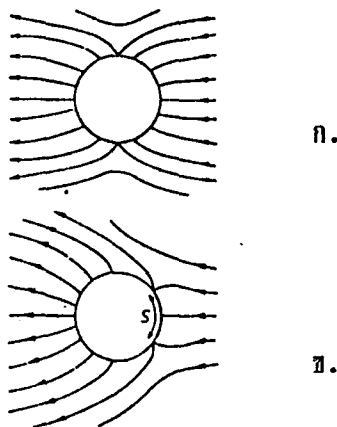
ค่าคงที่ K จะหาได้จาก ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสและศักย์ของการคายประจุเป็นวงกลม เมื่อใส่แผ่นโลหะไปแทนผิวที่เป็นฉนวน จากค่า I_1 และ I_c จะหาค่า V_p ได้ เมื่อทำการวัดค่าศักย์ที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนา, ค่าคงที่โคโรนา K และค่าต้านทาน R

2.2.3 การประจุแบบโคโรนาให้กับอนุภาค

เมื่อมีอนุภาคอยู่ในสนามไฟฟ้าที่มีค่าสม่ำเสมอ จะเกิดการโพลาไรซ์ขึ้น และจะดึงดูดไอออนที่มีขั้วต่างกับตัวมันมากกว่าครึ่งหนึ่งของผิวตัวมัน ดังนั้นอนุภาคที่เป็นกลางจะถูกประจุได้โดยนำอนุภาคไปติดกับไอออนที่มีขั้วเพียงขั้วเดียวและจะคายประจุ โดยเมื่อไปอยู่ในสนามที่มีการไอออไนซ์ที่ขบวกลบ

จำนวนประจุที่มาถึงตัวอนุภาค จะขึ้นอยู่กับค่าสนามไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาค เหตุผลก็คือ การคำนวณค่าประจุสูงสุดที่สามารถอยู่บนอนุภาคได้นั้น จะพิจารณาถึงความหนาของวัตถุที่เป็นทรงกลมในสนามไฟฟ้าที่มีค่าสม่ำเสมอ ค่าสนามจะมีค่าลดลง เนื่องจากความแตกต่างของค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของตัวนำที่เป็นทรงกลม ($\epsilon_r = \infty$) และอากาศ ($\epsilon_r = 1$) จะเห็นได้ชัดเจนว่า การลดลงของสนามจะต้องเกิดขึ้นเนื่องจากการนำที่ผิวของอนุภาคทรงกลม และขั้วไฟฟ้าที่เป็นแผ่นโลหะซึ่งจะทำให้เกิดสนามสม่ำเสมอ โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากันหมด ดังนั้นเส้นแรงสนามไฟฟ้าจะต้องเกิดการเพี้ยน (ลดลง) เพื่อที่จะคงความตรงของเส้นศักย์ที่มีค่าเท่ากันตลอดไว้

รูปที่ 2.2 แสดงอนุภาคทรงกลมที่เป็นตัวนำที่อยู่ในสนามที่มีค่าสนามสม่ำเสมอ ไอออนบวกที่อยู่สนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของสนามตามทิศของลูกศร ส่วนไอออนลบจะเคลื่อนที่ไปยังฝั่งตรงข้าม ดังนั้นเมื่ออนุภาคอยู่ในสนามไฟฟ้าไอออไนซ์ที่มีประจุเพียงค่าเดียว ซึ่งเกิดจากการคายประจุเป็นวงกลม ตัวไอออนจะไหลไปตามทิศของเส้นแรงสนาม และไปทำการประจุให้กับอนุภาคนั้น เมื่อได้รับประจุแล้ว ค่าศักย์ของอนุภาคก็จะเปลี่ยนแปลงทำให้สนามไฟฟ้ามีค่าลดลง หรือมีความเพี้ยนเกิดขึ้น จากรูป 2.2(ก) แสดงให้เห็นถึงเส้นสนามรอบๆ อนุภาคที่ยังไม่มีไอออนมา



รูป 2.2 แสดงอนุภาคตัวนำที่เป็นทรงกลมอยู่ในสนามไฟฟ้า ³

- ก) เมื่ออนุภาคไม่มีประจุอยู่
- ข) เมื่ออนุภาคมีประจุบวก

ทำการประจุให้กับตัวมัน หรือพิจารณาว่ามีไอออนบวกและลบ กระจายอยู่ทั่วพื้นผิวตัวมันในปริมาณที่เท่ากัน ส่วนรูป 2.2 (ข) เป็นอนุภาคที่ได้รับประจุบวก ซึ่งไอออนบวกจะสะสมอยู่ที่บริเวณพื้นผิวเล็กๆ S จะพบว่า ถ้าอนุภาคอยู่ในสนามไฟฟ้าที่มีไอออนทั้งค่าบวกและลบ (เช่นที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับ) ตัวอนุภาคจะจับไอออนลบไว้ทั่วพื้นผิวส่วนที่ใหญ่กว่า ทำให้มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อพิจารณารูป 2.2(ก) อีกครั้ง ถ้าไอออนทั้งสองมีสภาพคล้องตัวไม่เท่ากัน อนุภาคก็จะจับไอออนไว้บนพื้นผิวของมันทั้งหมดก็จริง แต่จะมีขั้วไฟฟ้าตามไอออนตัวที่มีสภาพคล้องสูงกว่า หรือตัวที่เคลื่อนที่เร็วกว่านั่นเองทำให้ผลรวมของประจุไม่เป็นศูนย์

ในสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการไอออไนซ์ที่มีขั้วทางไฟฟ้าเพียงขั้วเดียว ซึ่งเกิดจากการคายประจุเป็นวงกลมด้วยไฟฟ้ากระแสตรง อนุภาคจะถูกประจุจนอ้อมตัวเมื่อสนามดึงดูด (Attractive Field) เนื่องจากความเพี้ยนของสนาม มีค่าเท่ากับสนามผลักกัน (Repulsive Field) เนื่องจากประจุที่อยู่บนตัวอนุภาค และผลสุดท้ายคือ จะไม่มีการประจุให้กับอนุภาคอีก ค่าประจุสูงสุดซึ่งอนุภาคสามารถรับได้เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอโดยไอออนที่มีขั้วเพียงชนิดเดียวนั้น คำนวณได้จากแรงเนื่องจากการเพี้ยนของสนาม (วิธีการแปลงลาปลาซ (Laplace's Equation)) และแรงผลักกันเนื่องจากอนุภาคที่มีประจุ โดย q_{max} คือค่าประจุสูงสุดดังกล่าว

$$q_{max} = 4\pi\epsilon_0 a^2 pE \tag{2.2.3}$$

เมื่อ

$$p = 3\epsilon_T / (\epsilon_T + 2)$$

ซึ่งค่า p จะใช้ได้ทั้งอนุภาคที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนและตัวนำ โดย p จะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 3 สำหรับอนุภาคที่เป็นตัวนำ (มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ∞) และ 1 สำหรับอนุภาคที่เป็นฉนวน (มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 1)

จากสมการจะพบว่า ค่าประจุสูงสุดจะแปรผันตรงกับ ค่าสนามไฟฟ้าและกำลังสองของค่ารัศมีของอนุภาค และขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพียงเล็กน้อย แต่จะไม่ขึ้นกับความหนาแน่นของจำนวนไอออน ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จะมีผลก็ต่อเมื่ออยู่ในช่วงเวลาที่ใช้ในการทำให้ประจุบนอนุภาคอ้อมตัว ประจุบนตัวอนุภาคที่เวลา t ใดๆ หาได้จาก

$$q = q_{max} [1 / (1 + \tau/t)] \tag{2.2.4}$$

เมื่อ τ คือ เวลาที่ใช้ทำให้ประจุอนุภาคมีค่ากึ่งหนึ่งของค่าประจุเริ่มต้น ซึ่งหาได้จาก

$$= 4\epsilon_0/N_0eb \quad (2.2.5)$$

เมื่อ N_0 คือ ความหนาแน่นของไอออน (ตัวต่อลูกบาศก์เมตร), b คือ ค่าสภาพคล่องตัวของไอออน หาได้จาก

$$b = u/E$$

เมื่อ u คือ ความเร็วของไอออนในสนามไฟฟ้า E

สมการ 2.2.5 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปความหนาแน่นกระแส J และสนามไฟฟ้า E ได้ โดยใช้ความสัมพันธ์

$$J = N_0eu$$

และ

$$\begin{aligned} u &= Eb \\ &= 4\epsilon_0E/J \end{aligned} \quad (2.2.6)$$

สำหรับการคายประจุเป็นวงกลมโดยทั่วๆ ไป J จะมีค่า 10^{-4} แอมป์ต่อตารางเมตร และ E จะมีค่า 3×10^5 โวลต์ต่อเมตร
ดังนั้น

$$\tau \approx 0.1 \text{ วินาที}$$

นั่นคือ อนุภาคจะมีค่าประจุ 50% จากค่าประจุเริ่มต้นทั้งหมดจะใช้เวลา 0.1 วินาที และจะถึง 90% ในเวลา 1 วินาที เวลาที่ใช้ในการประจุอนุภาคจะเป็นฟังก์ชันของสภาพคล่องของประจุพาหะ (หมายถึง ไอออนที่จะไปประจุให้กับอนุภาค) ซึ่งปกติอิเล็กตรอนจะมีค่านี้นั้นมากกว่าไอออนบวก

2.2.4 การคำนวณค่าประจุสูงสุดบนอนุภาคทรงกลมที่อยู่ในสนามการคายประจุแบบวงกลม

แรงสุทธิของไอออนที่ไปถึงผิวของอนุภาคที่ถูกประจุนั้น เป็นการรวมแรงที่เกิดจากแรงดึงดูดบนทรงกลม (เกิดขึ้นเนื่องจาก ความเข้มข้นหรือการลดลงของสนามไฟฟ้า เมื่อมีอนุภาคเข้าไปอยู่) และแรงผลักเนื่องจากประจุที่อยู่บนอนุภาคอยู่แล้ว สนามไฟฟ้า E ที่ผิวของอนุภาคทรงกลม ที่เป็นตัวนำและยังไม่ได้รับการประจุที่อยู่ในสนามไฟฟ้า (ที่ป้อนให้หัวไฟฟ้า) สมมติเสมอ E_0 มีความสัมพันธ์เป็น

$$E = 2E_0 \cos\theta \tag{2.2.7}$$

เมื่อ $\theta = 0$ คือ ทิศทางของสนามที่ใส่เข้าไป ซึ่งก็คือสนามที่ดึงดูด ดังนั้นจะมีเครื่องหมายเป็นบวก สนามผลักที่ผิวของทรงกลมเนื่องจากประจุ q บนทรงกลมจะมีค่าเป็น $-q/4\pi\epsilon_0 a^2$ เมื่อ a เป็นรัศมีของทรงกลม

ค่าประจุมั้วที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่าสนามทั้งสองมีค่าเท่ากัน และ $3E_0 \cos\theta$ มีค่าสูงสุด นั่นคือ $\cos\theta = 1$ ดังนั้น q_{max} จะมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} 3E_0 &= q_{max} / 4\pi\epsilon_0 a^2 & (2.2.8) \\ q_{max} &= 12\pi\epsilon_0 E_0 a^2 \end{aligned}$$

ถ้าอนุภาคเป็นสารไดอิเล็กตริก ที่มีค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ ϵ_r จะทำสนามไฟฟ้าที่ผิวมีค่าเปลี่ยนแปลงไป คือมีค่าเป็น $E_p \cos\theta$ เมื่อ $p = 3\epsilon_r / (\epsilon_r + 2)$ ดังนั้นสำหรับสารไดอิเล็กตริกค่าประจุสูงสุดที่มีได้ก่อนสนามพลิกผัน เนื่องจากประจุบนทรงกลมจะผลักประจุออกไปมากกว่านี้คือ

$$q_{max} = 4\pi\epsilon_0 E_0 p a^2 \tag{2.2.9}$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุ ที่เกือบจะเป็นฉนวนโดยสิ้นเชิงจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1-10 ดังนั้น ค่า p จะมีค่าระหว่าง 1 และ 2.5 สำหรับอนุภาคที่เป็นตัวนำนั้น จะมีค่า $p = 3$ ทำให้สมการ 2.2.9 ลดรูปลงเป็นสมการสำหรับทรงกลมที่เป็นตัวนำเท่านั้น

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในบริเวณที่เกิดการคายประจุเป็นวงกลม ปกติจะมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันพั้ง นั่นคือ E_0 ในสมการ 2.2.8 มีค่าน้อยกว่า E_0 ถึง 10 เท่า

2.2.5 การคำนวณอัตราการประจุของอนุภาคทรงกลมในการคายประจุเป็นวงกลม

อัตราที่อนุภาคทรงกลมจะถูกประจุมีค่าเท่ากับ จำนวนประจุที่ไปถึงบริเวณพื้นผิวต่อหนึ่งวินาที โดยการอินทิเกรตตลอดพื้นผิว ได้ว่า

$$dq/dt = \int N_0 e u \, dA \tag{2.2.10}$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนไอออนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร, e คือ ค่าประจุต่อไอออน 1 ตัว u คือ ความเร็วของไอออน

เมื่อไอออนมีสภาพคล่อง b จะได้ว่า

ดังนั้น
$$u = Eb$$
$$dq/dt = \int N_0 e b E \, dA \tag{2.2.11}$$

ค่าสนามไฟฟ้า E ที่ผิวของอนุภาคที่เวลา t ใดๆ คือ ผลของสนามไฟฟ้าเริ่มต้น E_0 ที่ถูกลดทอนหรือทำให้เพิ่มขึ้น โดยการมีอนุภาคทรงกลมอยู่ ($E_0 P \cos\theta$) และสนามเนื่องจากประจุ q ได้ไปถึงทรงกลมเรียบร้อยแล้ว ($q/4\pi\epsilon_0 r^2$)

แทนค่า E ในสมการ 2.2.10 ด้วยค่าต่างๆ จะได้

$$\begin{aligned} dq/dt &= N_0 e b \int (3E_0 p \cos\theta - q/4\pi\epsilon_0 r^2) \sin\theta d\theta \\ &= 2\pi r^2 N_0 e b \int (3E_0 p \cos\theta - qE_0 p \cos\theta / q_{max}) \sin\theta d\theta \end{aligned}$$

เมื่อ $q_{max} = 4\pi\epsilon_0 r^2 p E_0$ คือ เวลาที่ใช้ในการทำให้อนุภาคมีประจุครึ่งหนึ่งของค่าประจุค่าสุดท้ายของมัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ สภาพคล่องของพาหะพาประจุและความหนาแน่นของประจุ

2.2.6 การประจุโดยการแพร่

การประจุโดยการแพร่ เกิดจากการชนกันระหว่าง ไอออนและอนุภาค เนื่องมาจาก ไอออนในก๊าซเคลื่อนที่แบบสุ่ม เมื่อได้รับพลังงานความร้อน

การประจุโดยใช้สนามไฟฟ้าเป็นทรงกลม จะให้ค่าประจุที่เป็นสัดส่วนกับค่ารัศมีของอนุภาคยก

กำลังสอง ดังนั้นถ้าเป็นอนุภาคขนาดเล็กๆ ก็จะเก็บประจุไว้ได้เพียงเล็กน้อย และเมื่อมีรัศมีน้อยกว่า 1.5 ไมโครเมตร การประจุโดยการแพร่จะมีความสำคัญมากกว่า

การคำนวณค่าประจุโดยการแพร่นี้ หาได้จาก ทฤษฎีจลน์ของก๊าซโดยความน่าจะเป็นที่ไอออนจะมีพลังงานมากกว่าศักย์ผลักรัง (Repulsive Potential; W) เนื่องจากอนุภาคมีประจุอยู่บ้างแล้ว คือ

$$N = N_0 \exp(W/kT) \tag{2.2.12}$$

เมื่อ N คือ ค่าพลังงานของไอออนที่มากกว่า W , N_0 คือจำนวนไอออนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร k คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน, T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์, W คือ ค่าพลังงานผลักรังระหว่าง ไอออนที่มีประจุ e และ อนุภาคที่มีรัศมี a และประจุ q จะได้ว่า

$$W = qe/4\pi\epsilon_0 a$$

จำนวนครั้งของการชนต่อ 1 วินาที ของไอออนกับอนุภาค จะเป็นอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงประจุต่อเวลา dq/dt ซึ่งขึ้นอยู่กับ

- (ก) จำนวนความหนาแน่นของไอออน ซึ่งมีพลังงานมากเพียงพอที่จะไปชนไอออนได้
- (ข) ความเร็วของไอออน v
- (ค) พื้นที่หน้าตัดของอนุภาค (πa^2) คือ

$$dq/dt = \pi a^2 N u_1 = \pi a^2 e u_1 N_0 \exp(qe/4\pi\epsilon_0 a kT) \tag{2.2.13}$$

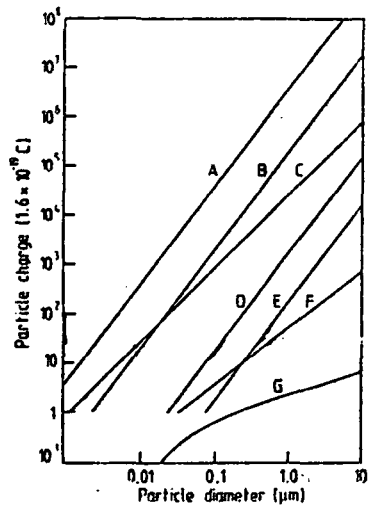
ประจุ q ที่เวลา t หาได้โดยหาอินทิเกรต

$$q = (4\pi\epsilon_0 a kT/e) [\ln(a N_0 q^2 u_1 t / 4\epsilon_0 kT) + 1] \tag{2.2.14}$$

เราจะไม่สามารรถคำนวณค่าประจุสูงสุดที่อนุภาคจะรับได้โดยการประจุแบบแพร่นี้ เพราะสำหรับค่าประจุใดๆ ก็ตาม ค่าความน่าจะเป็นที่ผลสุดท้ายจะมีไอออนที่มีพลังงานมากพอที่จะเอาชนะความต่างศักย์เนื่องจากประจุบนอนุภาคมีค่าน้อยและจำกัด ดังนั้นค่าประจุสูงสุดจะถูกจำกัด โดยการคายประจุ เมื่อสนามรอบๆ อนุภาคถึงค่า 3×10^{10} โวลท์ต่อเมตร จากทฤษฎีจลน์ของก๊าซเรา

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

จะได้รับความสัมพันธ์ระหว่าง ทฤษฎีการประจุโดยใช้สนามไฟฟ้า และ การประจุโดยการแพร่ นั้น แสดงดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงขีดจำกัดของประจุที่จะอยู่ในอนุภาคที่ขนาดต่างๆ ได้³

- A : ขีดจำกัดของไอออน เมื่อ $E_u = 2 \times 10^{10}$ v/m
- B : ขีดจำกัดของอิเล็กตรอน เมื่อ $E_u = 10^9$ v/m
- C : ขีดจำกัดของเรเลห์ เมื่อ $C_o = 2.1 \times 10^{-6}$
- D : ขีดจำกัดของประจุที่เกิดจากการเสียดสี และเกิดจากสนามไฟฟ้า เมื่อ $E = 3 \times 10^6$ v/m
- E : การประจุเนื่องจากสนาม เมื่อ $E = 3 \times 10^5$ v/m
- F : การประจุเนื่องจากการแพร่
- G : สมดุลของประจุสองขั้ว

2.2.7 ผลการทดลองการประจุในการคายประจุเป็นวงกลม

เอดมอนสัน (Edmonson) (ทำการทดลองเมื่อ 1961), ฮิวลิท (Hewitt) (ทำการทดลองเมื่อ 1957), โปเตนีเยอและมอริ-อาโน (Pauthenier and Moreau-Hanot) (ทำการทดลองเมื่อ 1932), เพนนี่และลินช์ (Penny and Lynch) (ทำการทดลองเมื่อ 1957), และไวท์ (White) (ทำการทดลองเมื่อ 1963) ได้ทำการทดลอง วัดค่าประจุที่มีอยู่บนอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร โปเตนีเยอและ มอริ-อาโนนั้น ครอบคลุมไปถึงขนาด 100 ไมโครเมตร ผลการศึกษาทั้งหมดออกไปในทางที่สอดคล้องกันกับทฤษฎีการประจุ

โดยสนามไฟฟ้าของ โปเตนเชียลและมอร์-อาโน โดยการทดลองที่กล่าวมาทั้งหมด คิดอนุภาคที่เป็นทรงกลมเรียบ แต่ ฮิวนิท (Hignilt) (ทำการทดลองเมื่อ 1967) ใช้ขี้เถ้าเป็นตัวทดลองขนาด 2.5-100 ไมโครเมตร ซึ่งจะกลมก็ต่อเมื่อมีขนาดเล็กมากๆ อัตราการประจุของอนุภาคเหล่านี้ค่อนข้างมีค่าต่ำกว่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี เช่น อนุภาคขนาด 13.5 ไมโครเมตร จะใช้เวลาถึง 1 วินาที ในการประจุให้ได้ 80% ของค่าทั้งหมด แทนที่จะใช้เวลา 0.1s ตามค่าที่ได้จากการคำนวณ

แต่อย่างไรก็ตาม อนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตร อาจใช้เวลามากกว่าค่าที่คำนวณได้ เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่จะไม่เป็นทรงกลมเรียบตามแบบที่ใช้ในการคิดตามทฤษฎี

อนุภาคที่ขนาดเล็กๆ นั้น ฮิวนิทได้ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ประจุที่อยู่บนอนุภาคและขนาดของอนุภาค, ความหนาแน่นกระแสไอออนและค่าสนามภายนอก โดยใช้ออนุภาคของ ไดออกพทาเลท (Diocetyl Phthalate) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.1-1.3 ไมโครเมตร ผลที่ได้คือ

(ก) ความคล่องตัวทางไฟฟ้าของอนุภาค (ซึ่งขึ้นอยู่กับ ประจุ, มวล และวิธีการวัดความ สามารถที่มันจะเคลื่อนที่ไปในสนามไฟฟ้าได้) มีค่าน้อยที่สุด สำหรับอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.02-0.4 ไมโครเมตร

(ข) สนามไฟฟ้าภายนอกจะมีผลกับอนุภาคที่มีขนาดเล็กเท่ากับ 0.14 ไมโครเมตร

(ค) ใช้ทฤษฎีการประจุโดยการแพร่ เมื่อไม่มีค่าสนามไฟฟ้าภายนอกใส่เข้าไป

(ง) เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าสูง และ อนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตร จะใช้ทฤษฎีการประจุของพาวเทเนียร์

(จ) การคิดค่าผลรวมของประจุทั้งหมดใช้ทั้งวิธี การประจุโดยการแพร่ และ การประจุโดยสนาม เพื่อจะได้ครอบคลุมทุกสภาวะที่เกิดขึ้นจริง

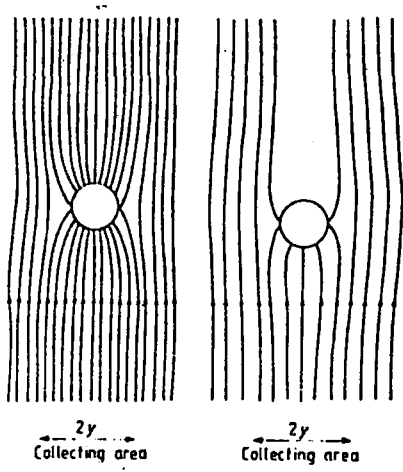
2.2.8 ปัจจัยทางเคมีที่มีผลต่อการประจุ

ทฤษฎีการประจุใช้การสมมติว่าเมื่อไอออนเคลื่อนตัวไปถึงอนุภาคแล้วจะไปติดอยู่กับตัวอนุภาคซึ่งในความเป็นจริงพบว่า ไม่ได้เป็นแบบนี้เสมอไป ความน่าจะเป็นที่ไอออนจะยังคงติดอยู่กับอนุภาค ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของผิวของอนุภาค ซึ่งค้นพบโดย สามพูร์น-ซิง (Sampurn-Singh, 1981) โดยในการทดลองบางครั้งจะเกิดปัญหาขึ้น ในการหาค่าประจุสูงสุดบริเวณผิวของผงที่มีคุณสมบัติโพลีเมอร์ โดยจะได้ความสัมพันธ์ว่า การประจุได้ต่ำขึ้นอยู่กับการขาดโมเลกุลที่มีขั้วในบริเวณผิวของอนุภาค ซึ่งความสัมพันธ์นี้ได้มีการอธิบายไว้ 2 ลักษณะ คือ 1) อนุภาคที่

ขาดโมเลกุลที่มีชีวิตอยู่ในตัว มีแนวโน้มที่จะมีความต้านทานบริเวณผิวสูงมากกว่าที่บริเวณอื่น ทำให้ประจุไม่สามารถแผ่กระจายไปได้ทั่วพื้นผิว อนุภาคค้ำที่มีไอออนมาชนจะมีค่าประจุสูงมากและจะดันไอออนที่มีอยู่เดิมในอนุภาคนั้นให้เคลื่อนที่ไปยังอีกด้านหนึ่งของอนุภาคซึ่งจะทำให้อนุภาคเกิดการอิมิตัว (ปรากฏการณ์เช่นนี้บอกให้ทราบว่า อนุภาคจะไม่หมุนไปในทางเดินของอากาศ) 2) จากหลักการในการสร้างพันธะนั้นไอออนจำเป็นจะต้องจับกับโมเลกุลที่มีชีวิต ซึ่งจะเกิดขึ้นโดยโมเลกุลที่มีชีวิตจะดูดไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับตัวมันไว้ที่ผิวของตัวมัน ซึ่งจากทดลองโดยใช้พวงไนลอน (NY-LON) พบว่าพวงไนลอนจะสามารถถูกประจุได้ง่าย เมื่อใช้การคายประจุเป็นวงกลมแบบขั้วบวก แต่ถ้าใช้แบบขั้วลบจะทำให้ประสิทธิภาพการประจุลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณาโครงสร้างของไนลอนแล้วพบว่า มีโมเลกุล OH ขั้วลบอยู่ที่พื้นผิว ซึ่งจะสนับสนุนทฤษฎีดังกล่าวว่า การประจุขึ้นกับสมบัติทางเคมีของอนุภาคนั้นๆ

2.2.9 การเคลื่อนที่ของอนุภาค

เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เทียบกับสนามไฟฟ้าแล้ว ปกติก็มักจะเกิดแรงทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Force) ขึ้นด้วย แต่ วิปเปิลและคาลเมอร์ (Whipple and Chalmers, 1944) ได้ทำการศึกษารวมไอออนด้วยตัวรวบรวมทรงกลมที่มีค่าประจุอยู่โดยการใส่สนามไฟฟ้าขนานไปกับทิศการไหลของอากาศ พบว่า ความเร็วของอากาศไม่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอากาศ



ก. ข.

รูปที่ 2.4 แสดงเส้นทางเดินของไอออนลบ ที่เคลื่อนที่ไปชนอนุภาคตัวนำ³
 ก) เคลื่อนที่ด้วยความเร็วปกติ ข) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $2be$

จากรูป 2.4 แสดงให้เห็นถึง ทางเดินของไอออนลนตรงไปยังอนุภาคที่เป็นกลาง เมื่อไม่มีการไหลของอากาศ และมีการไหลของอากาศด้วยความเร็ว $v = 2bE$ ในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของไอออน (b คือ สภาพความคล่องตัวของไอออน และ E คือ ค่าสนามไฟฟ้า ดังนั้น การไหลของอากาศจะมีค่าเป็นสองเท่าของความเร็วของไอออน) ถ้า y คือ ระยะทางจากแกนของขั้วจำกัดของทางเดินของไอออนที่จะมาบรรจบกัน วิปเปิลและคาลเมอร์ พบว่า

$$y^2 = b(3Ea^2 + q/4\pi\epsilon_0) / 3Ea^2(v+bE) \quad (2.2.15)$$

เมื่อไม่มีประจุอยู่บนอนุภาคเลย และความเร็วของอากาศ v เป็นศูนย์ด้วย ทำให้ลดรูปลงมาเป็น $3a^2$ นั่นคือ อนุภาคทรงกลมที่เป็นตัวนำและยังไม่ได้ทำการประจุ จะสามารถจับไอออนจากทรงกระบอกได้ โดยมีพื้นที่หน้าตัดเป็นสามเท่าของพื้นที่หน้าตัดของทรงกลม

โดยมีอัตราการจัดจับไอออนเป็น

$$G = [\pi n b (3Ea^2 + q/4\pi\epsilon_0)^2] / 3Ea^2 \quad (2.2.16)$$

เมื่อ q คือ ประจุของอนุภาค

ซึ่งจากสมการจะเห็นว่า เป็นอิสระต่อความเร็วของก๊าซ และการให้ประจุ q ระหว่าง $12\pi\epsilon_0 a^2$ (ในทางปฏิบัติอนุภาคจะอยู่นอกเหนือช่วงนี้)

ถ้าไอออนเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับสนามเหมือนกับอนุภาค ความเร็วของอนุภาคก็จะมีผลต่อประจุด้วย เช่น อนุภาคอาจจะเคลื่อนที่เร็วมาก จนกระทั่งไอออนไม่สามารถจะตามอนุภาคทัน ทำให้การประจุลดลง ในกรณีนี้ y จะมีค่า

$$y^2 = -4bq/4\pi\epsilon_0(v-bE) \quad (2.2.17)$$

ถ้า q เป็นบวก ดังนั้นความเร็วของอากาศต้องมีค่าน้อยกว่า bE ถ้า y^2 เป็นบวก และ y เป็นจำนวนจริงใดๆ

2.2.10 ลมไอออน (Ion Wind)

ค่าระยะทางเฉลี่ย (Mean Free Path) ของไอออนในอากาศ ที่มีความดันบรรยากาศ

กาศปกติ (นั่นคือ ระยะทางที่มันเคลื่อนที่ไปได้ ก่อนที่จะไปชนกับโมเลกุลที่เป็นกลาง) จะมีค่าประมาณ 2×10^{-7} เมตร เมื่อคิดว่า มวลของไอออนมีขนาดเท่ากับมวลของโมเลกุลของก๊าซที่เป็นกลาง หลังจากการชน สนามไฟฟ้าจะทำการเร่งตัวไอออนให้ไปชนกับ โมเลกุลที่เป็นกลางตัวอื่น การชนเช่นนี้จะเกิดขึ้นหลายครั้งก่อนที่ไอออนจะไปถึงขั้วไฟฟ้าศักย์ศูนย์ รวมทั้งทำให้โมเลกุลที่เป็นกลางมีความเร็วที่มีทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า เรียกเหตุการณ์เช่นนี้ว่า ลมไอออน (Ion Wind) ลมนี้จะถูกสร้างขึ้น โดยการถ่ายเทพลังงานจากไอออน ไม่ได้เกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนเอง

2.2.10.1 การหาค่าความเร็วของไอออน

เมื่อพิจารณาไอออนเคลื่อนที่จากจุด $x = 0$ ไปยังระยะ $x = L$ พลังงานของสนามไฟฟ้าจะถ่ายเทไปเป็นการเคลื่อนที่ของปริมาตรของก๊าซ จากหลักการการทรงพลังงานจะได้ว่า

$$Du^2/2 = \int_0^L Q_v E \, dx \tag{2.2.18}$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่นของก๊าซ, Q_v คือ ความหนาแน่นประจุ, u คือ ความเร็วของลมไอออน

จากกฎของปัวซอง (Poisson's Law)

นั่นคือ

$$\rho = \epsilon_0 \operatorname{div} E$$

$$u = \left[(2\epsilon_0/D) \int_0^L (\operatorname{div} E) E_x \, dx \right]^{1/2} \tag{2.2.19}$$

จะเห็นว่า จะหาค่าความเร็วของลมในระบบใดก็ได้ โดยต้องทราบค่าสนามไฟฟ้า และเกรเดียนต์ของสนาม (Field Gradient) ถ้าพิจารณาระบบ 1 มิติ คือ สนามมีค่า V/L (V คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับขั้วไฟฟ้า)

$$\operatorname{div} E = V/L^2$$

และ

$$u = (2\epsilon_0 E/D)^{1/2} \tag{2.2.20}$$

แต่ในทางปฏิบัติ สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการคายประจุเป็นวงกลมจะไม่ทราบค่าแน่นอน แต่ก็สามารถวัดค่ากระแสและศักดาโคโรนาได้โดยการแปลงสมการ 2.2.20 ให้อยู่ในรูปความหนาแน่นกระแส J (โดยโรบินสัน, Robinson, 1970)

$$u^2 = 2/D \int_0^L J/b \, dx \tag{2.2.21}$$

โดยความหนาแน่นกระแสจะเป็นฟังก์ชันของ x ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของระบบ โดยโรบินสันได้ใช้ตัวแปรรูปร่าง g ในการคิด และ K คือ ค่าพลังงานที่สูญเสียไปในระบบที่ยอมรับได้ เมื่อการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลง จะได้ค่าความเร็วลมอยู่ในรูปของกระแส I จากวงจรรภายนอกเป็น

$$u = g(I/DbK)^{1/2}$$

โดย b คือ สภาพความคล่องตัวของไอออน

การประมาณค่าความเร็วลมสูงสุดหาได้จากสมการ (2.2.20) โดยใช้ค่าสนามสูงสุดซึ่งก็คือ ค่าสนามพัง (Breakdown Field) ของอากาศ (3×10^6 โวลต์ต่อเมตร) ทำให้ได้ค่าความเร็วลมสูงสุด 10.8 เมตรต่อวินาที ซึ่งในการใช้สนามโคโรนา (3×10^5 โวลต์ต่อเมตร) ถ้าทำให้ได้ความเร็วของลมไอออนอยู่ในช่วง 1-2 เมตรต่อวินาที

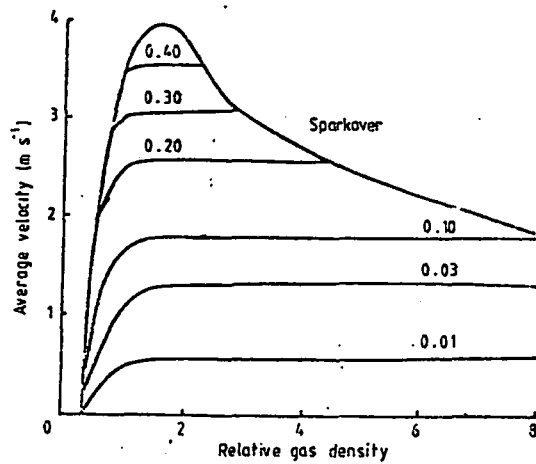
ความเร็วของลมไอออนจะเพิ่มขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้า (ซึ่งก็หมายถึง ความหนาแน่นกระแส) เพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถทำให้ค่าความเร็วลมมากขึ้นได้ โดยการเปลี่ยนรูปร่างของขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสเพิ่ม เช่น การเพิ่มจำนวนจุดในระบบที่เป็นการเรียงตัวของจุดกับขั้วที่เป็นระนาบ จะทำให้ความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้น ถึงจุดที่ระยะห่างระหว่างขั้วมี ค่าประมาณ 1 เซนติเมตร ซึ่งค่าที่ต่ำกว่านี้จะไม่ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้นอีก ความเร็วลมจะเพิ่มขึ้นเมื่อสภาพความคล่องตัวของไอออนลดลง ดังนั้นการคายประจุบวกจะทำให้ ความเร็วลมมีค่ามากกว่าการคายประจุลบในก๊าซที่ไม่มีอิเล็กตรอนติดอยู่ เช่น ไนโตรเจน ลมจะเกิดจากประจุบวกเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากอิเล็กตรอนมีสภาพความคล่องตัวสูงมาก ฉะนั้นจากสมการจะเห็นว่า ความเร็วของลมไอออนขึ้นกับผลคูณระหว่าง ความหนาแน่นของก๊าซและความคล่องตัวของไอออน เนื่องจากสภาพความคล่องตัวของไอออนแปรผกผันกับความหนาแน่นของก๊าซ ดังนั้นถ้าให้ก๊าซชนิดหนึ่งๆ ไหลผ่านระบบ ความเร็วของลมก็จะเป็นอิสระกับความหนาแน่นของก๊าซหรือความดัน

ประสิทธิภาพภายในการแปลงพลังงานจากสนามไฟฟ้าไปเป็นลมไอออน หาได้จากพลังงานจลน์ที่ถ่ายเทสู่มวล M ของก๊าซต่อ 1 หน่วยเวลา/กำลังไฟฟ้าขาเข้า

ซึ่งโรบินสัน (1961) พบว่ามีค่าประมาณ 1%

2.2.10.2 การทดลองวัดความเร็วลมไอออนที่ได้มีการศึกษามาก่อน

โรบินสัน (Robinson, 1961) ได้ทำการวัดความเร็วลมจากจุดที่มีศักย์สูง ที่ศูนย์กลางของขั้วครึ่งทรงกลม ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร พบว่า มีค่าความเร็วลมมากกว่า 4 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อใช้ค่าตัวแปรทางรูปร่างของระบบที่เหมาะสม และมีการคิดการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้น ผลที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากสมการ 2.2.21



รูปที่ 2.5 แสดงความเร็วของลมไอออนกับกระแสในการคายประจุเป็นวงกลม³

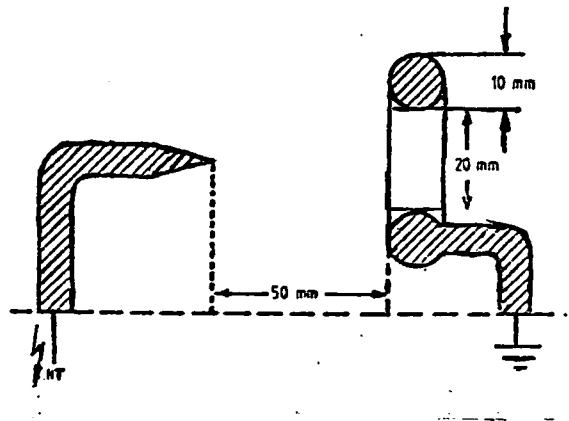
ผลการวัดความเร็วลมของไอออนที่บริเวณเหนือแผ่นรับประจุ สำหรับการคายแบบวงกลมจากขั้วจุดไปยังขั้วแผ่น (ขั้วที่เป็นจุดปล่อยประจุไปยังขั้วที่เป็นแผ่นโลหะ) ที่มีระยะห่าง 40 มิลลิเมตร แสดงดังในตาราง 2.1 แผ่นโลหะที่มีศักย์เป็นศูนย์กลางจะแบ่งออกเป็นช่องๆ ด้วยระยะเท่าๆ กัน และแยกออกจากกันทางไฟฟ้าโดยสิ้นเชิง แล้วทำการวัดความเร็วลมและความหนาแน่นกระแสที่แต่ละแผ่น พบว่า ความเร็วของลมไอออนเพิ่มขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างจุดกับแผ่นระนาบมีขนาดเล็กจนถึง 60 มิลลิเมตร แต่ที่ระยะห่างมากกว่านี้ จะทำให้ความหนาแน่นกระแสลดลงที่แต่ละช่อง และที่ระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบมีค่ามากกว่านี้ จะเกิดการสูญเสียกระแสขึ้นอย่างมากมาย โดยไหลไปสู่ภายนอก และยังจะทำให้ค่าความเร็วลมสูงสุดจะลดลงด้วย

ที่ระยะห่าง 60 มิลลิเมตร และ เมื่อค่าศักย์มีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันพังของอากาศจะวัดความเร็วของลมได้ 5 เมตรต่อวินาที แต่สภาวะโคโรนาค่อนข้างจะไม่เสถียร และมีความเร็วคงที่ๆ ค่า 2.5 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าที่จะคงไว้ได้ในทางปฏิบัติ ความเร็วลมจะสูงมากกว่านี้

ตาราง 2.1 ตารางแสดงค่าความเร็วลมและกระแสของการคายประจุแบบ
วงกลมระหว่างขั้วที่เป็นจุด และเป็นแผ่นระนาบระยะห่าง 4
เซนติเมตร มีค่าสนามเฉลี่ย 5.5 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร³

จำนวน ช่องจาก ช่องแรก	ลบ				บวก			
	ขั้วจุดที่มีความละเอียดยิ่งขึ้น		ขั้วจุดที่มีความคมชัด		ขั้วจุดหยาบๆ		ขั้วจุดหยาบๆ	
	กระแส (A/cm ²)	ลม (m/s)	กระแส (A/cm ²)	ลม (m/s)	กระแส (A/cm ²)	ลม (m/s)	กระแส (A/cm ²)	ลม (m/s)
1	0.5	1.8+	2.0	2.3+	1.8	1.8+	2.4	1.6+
2	1.1	1.6+	1.6	2.0+	1.7	1.7+	1.6	1.7+
3	1.4	1.8+	1.5	1.8+	1.5	1.9+	1.1	1.7+
4	1.3	2.1+	1.4	1.6+	1.3	1.7+	0.78	1.4+
5	1.2	1.9+	1.2	1.6	1.0	1.6	0.60	1.4
6	1.0	1.8+	0.85	1.4	0.75	1.3	0.45	1.3
7	0.89	1.8	0.60	1.3	0.59	1.2	0.39	1.2
8	0.68	1.8	0.45	1.1	0.43	1.2	0.32	1.1
9	0.53	1.8	0.32	0.9	0.31	1.1	0.26	1.0
10	0.45	1.5	0.23	0.9	0.23	0.9	0.14	0.9
11	0.30	1.3	0.15	0.8	0.17	0.8	0.10	0.7
กระแสนอก								
รัศมี 6 cm								
(A)	21.5		10.5		11.5		3.5	
กระแสโคโรนา								
บนแผ่น								
(A)	88.9		75		68		39	

ถ้าใช้หัวไฟฟ้าเป็นวงกลม พื้นที่หน้าตัด 10 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร วางห่างจากหัวปล่องประจุ 50 มิลลิเมตร เป็นหัวรับประจุ ดังแสดงในรูป 2.6 จะวัดค่าความเร็วลมสูงสุดได้ 7 เมตรต่อวินาที ที่บริเวณแกน



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของหัวที่เป็นวงกลมสำหรับกำเนิดลมอ่อน ³

2.3 การประยุกต์ใช้ไฟฟ้าสถิตย์เพื่อปรับปรุงสภาพของก๊าซ

2.3.1 บทนำ

แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้นกับอนุภาคที่มีประจุ q ในสนามไฟฟ้า E คือ

$$F_e = qE \tag{2.3.1}$$

ทั้งค่าสนามไฟฟ้าและค่าประจุจะถูกจำกัด โดยค่าการนำไฟฟ้าของอากาศทำให้แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ค่อนข้างจะมีค่าน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตาม ค่าประจุสูงสุดที่สามารถประจุให้กับอนุภาคได้ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวของอนุภาค ดังนั้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงจะทำให้อัตราส่วนระหว่างค่าประจุกับมวลมีค่าเพิ่มขึ้น และในที่สุด แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ก็จะมีค่าเกินแรงโน้มถ่วงของโลก ดังนั้นก็จะสามารถใช้แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ควบคุม และบังคับการเคลื่อนไหวของอนุภาคที่มีประจุ หรือ ละอองน้ำที่มีขนาดเล็กมากได้ โดยช่วงขนาดของอนุภาคดังกล่าวสามารถ คำนวณได้จาก แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงที่กระทำกับอนุภาคทรงกลม รัศมี a ความหนาแน่น D คือ

$$F_g = (4/3)\pi a D g \tag{2.3.2}$$

แรงทางไฟฟ้าสถิตย์สูงสุดคือ

$$F_o = q_{max} E_{max} \tag{2.3.3}$$

ค่าประจุต่อหน่วยพื้นที่สูงสุด สามารถคำนวณได้จาก กฎของเกาส์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.64×10^{-5} ดังนั้น สำหรับทรงกลมรัศมี a แรงเนื่องจากไฟฟ้าสถิตย์จะมีค่าเท่ากับ

$$F_o = 2.64 \times 10^{-5} \times 4\pi a E_{max} \tag{2.3.4}$$

แรงทางไฟฟ้าสถิตย์จะมีค่ามากกว่าแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก เมื่อเทียบสมการ(2.3.2) และ (2.3.4) ($F_o > F_g$) จะได้ว่า

$$a < 8 \times 10^{-6} E_{max} / D \tag{2.3.5}$$

ถ้าอนุภาคมีความหนาแน่น 10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ ในสนามไฟฟ้าที่ค่าขีดจำกัด การนำกระแสของอากาศ (Electrical Field at The Breakdown Limit of Air) เป็น 5×10^5 โวลต์ต่อเมตร จะได้ค่ารัศมีของอนุภาคคือ

$$a < 24 \times 10^{-3} \text{ เมตร} \tag{2.3.6}$$

นี่คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด ที่สามารถควบคุมการเคลื่อนไหว โดยใช้แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ได้ จะมีค่าตาม (2.3.6)

ในทางปฏิบัติ ไม่สามารถที่จะคงค่าสนามไฟฟ้า ที่ค่าขีดจำกัดการนำกระแสของอากาศได้ ซึ่งโดยปกติจะใช้ค่า 5×10^5 โวลต์ต่อเมตร ค่ารัศมีของอนุภาคสูงสุด ที่แรงทางไฟฟ้าสถิตย์สามารถจะบังคับการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นได้จริงๆ จะมีค่าที่น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ เมื่อสมมติให้ค่าประจุและค่าสนามไฟฟ้าเป็นค่าสูงสุด

ขีดจำกัดของความเร็ว u ของอนุภาคที่มีประจุ ในสนามไฟฟ้าในอากาศ สามารถที่จะคำนวณได้โดยเทียบ แรงทางไฟฟ้าสถิตย์กับแรงต้านของอากาศ ตามกฎของสโตรก (Stroke Law)

$$6\pi\eta a u = 2.64 \times 10^{-5} \times 4\pi a^2 E \tag{2.3.7}$$

เมื่อ η คือ ความหนืดของอากาศ มีค่าประมาณ $1.8 \times 10^{-5} \text{ N s m}^{-2}$

$$u = 1.76 \times 10^{-5} a E \eta^{-1}$$

$$u \approx E a \tag{2.3.8}$$

ดังนั้น เมื่อใช้ค่าสนามไฟฟ้าที่ค่าขีดจำกัดการนำกระแสของอากาศเป็น 5×10^5 โวลต์ต่อเมตร จะได้ค่า ความเร็วสูงสุด คือ 50 เมตรต่อวินาที ที่อนุภาคมีขนาด 100 ไมโครเมตร และ 0.5 เมตรต่อวินาที ที่อนุภาคมีขนาด 0.1 ไมโครเมตร

จากสมการที่ (2.3.8) จะเห็นว่า อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ คือต่ำกว่าไมครอน จะเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าได้ช้ามาก และการไหลของอากาศจะมีอิทธิพลมากกว่าค่าแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ ช่วงขนาดรัศมีของอนุภาคที่อยู่ในวิสัยควบคุมของแรงทางไฟฟ้าสถิตย์จะอยู่ระหว่าง 1 ไมโครเมตร ถึง 2 มิลลิเมตร

แรงคูลอมบ์ที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุ ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (ดังสมการที่ 2.3.1) จะกระทำต่ออนุภาคที่ไม่มีประจุ ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอด้วย แต่เรียกเป็นแรงไดโพล หรือ Dielectric Phoretic Force ซึ่งจะเกิดได้ทั้งสนามไฟฟ้าที่เกิดจาก กระแสตรงและกระแสสลับ แต่จะมีค่าต่ำกว่าแรงคูลอมบ์ โดยแรงนี้จะมีผลอย่างมากกับอนุภาคบางชนิดเช่น ของเหลว

2.3.2 ทฤษฎีว่าด้วยการดักจับในการไหลที่มีลักษณะเป็นชั้นๆ (Laminar Flow)

เมื่อพิจารณาฝุ่นผงที่เคลื่อนที่ในแนวตั้ง ในเครื่องดักจับฝุ่นที่มีลักษณะทางเดินของของ ก๊าซเป็นทรงกระบอก ด้วยความเร็ว u แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ที่กระทำต่ออนุภาคในสนามไฟฟ้า E_0 คือ

$$F_0 = qE_0 \tag{2.3.9}$$

เมื่ออนุภาคมีรัศมี a ($a > 1$ ไมโครเมตร) จาก ทฤษฎีการประจุของพาวเทนเนียร์ (Pauthenier's Charging) จะได้ค่าประจุสูงสุด ที่อนุภาคนั้นๆ สามารถที่จะถูกประจุไว้ได้ มีค่าเท่ากับ

$$q_{max} = 4\pi \rho_p E_0 a^2 \tag{2.3.10}$$

เมื่อ E_c คือ ค่าสนามไฟฟ้าที่อนุภาคถูกประจุ , $E_c = 8.8 \times 10^{-12}$ F/m และ $p = 3 E_T / (E_T + 2)$ ที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก $E_T = 2$ จะได้ว่า $p = 1.5$ ในขณะที่ถ้าเป็นโลหะ $E_T = \infty$ จะได้ว่า $p = 3$ ดังนั้น แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ ที่กระทำต่ออนุภาคที่เป็นไดอิเล็กตริก และมีประจุสะสมอยู่เต็ม คือ

$$F_c = 6\pi \epsilon_0 a^2 E_c E_0 \tag{2.3.11}$$

แรงต้านของอากาศที่กระทำต่ออนุภาค ซึ่งหาได้จากกฎของสโตรค คือ

$$F_d = 6\pi \eta a w \tag{2.3.12}$$

เมื่อ η คือ ความหนืดของอากาศ เมื่อเทียบสมการ 2.3.11 และ 2.3.12 เข้าด้วยกัน จะได้ว่า

$$F_d = 6\pi \eta a w = F_c = 6\pi \epsilon_0 a^2 E_c E_0$$

และ

$$w = \epsilon_0 a E_c E_0 / \eta \tag{2.3.13}$$

ถ้าอนุภาคนั้นมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จะต้องปรับแรงต้านของอากาศ ด้วยค่าแก้ของคันทิงแฮม (Cunningham Correction Factor) และจะต้องรวมค่าประจุที่เกิดจากการแพร่ เข้าไปในการคำนวณประจุที่เกิดขึ้นบนอนุภาคด้วย

ถ้า t คือ เวลาทั้งหมดที่อนุภาคที่มีประจุจะต้องใช้ เพื่อเคลื่อนที่ไปในสนามไฟฟ้าให้ได้ระยะทาง d เพื่อไปยังตัวรวบรวม (หัวที่มีประจุเป็นตรงข้าม) หาได้จาก

$$t = d/w = d / \epsilon_0 a E_c E_0 \tag{2.3.14}$$

โดยทั่วไป

ดังนั้น เวลาที่ใช้สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เมตร เพื่อเคลื่อนที่ไปยังตัวรวบรวมจะมีค่า 0.68 วินาที

จากหัวข้อ 2.2.3 ที่เวลา t อนุภาคจะถูกประจุให้ตัวเองมีประจุ q มีความสัมพันธ์เป็น

$$q/q_{max} = t' / (t'+\tau)$$

เมื่อ

$$\tau = 4E_0E/J$$

อนุภาคจะมีประจุครึ่งหนึ่ง (50%) ของประจุสูงสุดที่เวลา และ 90% หลังจากเวลา 9τ (สำหรับเครื่องขนาดใหญ่)

ช่วงระยะเวลาที่ประสิทธิภาพการจับสูงสุด จะมีค่าหลายวินาที แต่ก็ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการประจุประจุเข้าสู่ตัวอนุภาค และระยะเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปสู่ตัวรวบรวม

ในทางปฏิบัติ เครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ส่วนใหญ่ จะใช้ในการทำความสะอาดก๊าซ ที่มีปริมาณสูงมีขนาดใหญ่ เช่น ในการจับเถ้าถ่านที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน ซึ่งในการทำงานเช่นนี้ การไหลของอากาศจะไม่เป็นชั้นๆ ตัวรวบรวมส่วนใหญ่จะเป็นแผ่นคู่ขนาน ไม่ใช่ทรงกระบอกดังจะได้กล่าวถึงพฤติกรรมในหัวข้อถัดไป

2.3.3 การไหลที่มีลักษณะไม่เป็นชั้น (Non-Laminar Flow) และ สมการของดอยท์ซ์ (Deutscg Equation)

ทฤษฎีที่อธิบายการดักจับ ในการไหลแบบไม่เป็นระเบียบ หรือ มีรูปแบบไม่แน่นอน พัฒนาขึ้นโดย ดอยท์ซ์ (Deutscg, 1922) โดยการสมมติให้การดักจับ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ บริเวณที่อยู่ใกล้ขั้วไฟฟ้าที่มีศักย์ศูนย์ จะมีลักษณะเป็นชั้นๆ ดังอธิบายในหัวข้อ 2.3.2 และ บริเวณที่ไม่เป็นระเบียบ จะอยู่ในส่วนที่เหลือ ซึ่งมีบริเวณกว้างมาก ส่วนในบริเวณที่คาบเกี่ยวกัน จะสมมติให้เป็นบริเวณ ที่ประจุมีพฤติกรรมที่ผิดแปลกไปจากปกติ ซึ่งปกติจะมีค่าความหนาแน่นของประจุ ตลอดในพื้นที่หน้าตัดหนึ่งๆ เมื่ออนุภาคอยู่ในบริเวณขอบเขตที่เป็นชั้นๆ อนุภาคนั้นจะอยู่ภายใต้แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว w ตรงไปยังแผ่นคู่ขนาน เรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วในการเคลื่อนย้าย (Migration Velocity) ในช่วงเวลาเล็กๆ dt อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง $w dt$ เมื่อคิดพื้นที่ที่ ขั้วรับหรือแผ่นคู่ขนาน dA ซึ่งจะทำให้ลดความหนาแน่นประจุปกติลงไป dC

เมื่อเทียบอัตราการสูญเสียอนุภาคจากก๊าซ กับ อัตราที่อนุภาคไปถึงยังบริเวณพื้นผิวรวบรวม จะได้ว่า

$$u_x dC_x = -wC_x dA$$

เมื่อ u_x คือ ปริมาตรอัตราการไหลของก๊าซ นั่นคือ

$$1/C_p dC_p = -w/u_x dA$$

ทำการอินทิเกรต จะได้ค่าประสิทธิภาพ ξ ออกมาเป็น

$$\xi = (1 - C_{out}) / C_{in} = 1 - \exp(-Aw/u_x)$$

เมื่อ C_{in} และ C_{out} เป็นความหนาแน่นขาเข้า และขาออกตามลำดับ และ A คือ พื้นที่ในการรวบรวมทั้งหมด A/u_x เรียกว่า พื้นที่รวบรวมเฉพาะ ให้เป็น α จะเขียนค่าประสิทธิภาพได้เป็น

$$\xi = 1 - \exp(-\alpha w) \tag{2.3.15}$$

ซึ่งเรียกสมการนี้ว่า สมการของดอยท์ซ์ (Deutsch Equation)

ถ้าใช้ ทฤษฎีการประจุของพาวเทเน็ส จะทำให้ความเร็วในการเคลื่อนย้าย มีค่าเท่ากับที่ได้จากสมการ 13 ทำให้สามารถเขียนสมการของดอยท์ซ์ได้เป็น

$$\xi = 1 - \exp(-E_a E_c \alpha / \eta) \tag{2.3.16}$$

ทำการประมาณ ให้ $E_c E_a = V^2 / d$ และใช้ลอกการิทึม จะได้เป็น

$$\ln(1 - \xi) = -E_a V^2 \alpha / \eta d \tag{2.3.17}$$

ในปี ค.ศ. 1963 ไวท์ (White) ได้ทำการประมาณจากสูตรว่า ค่า $E_c E_a$ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานที่การปล่อยประจุเป็นวงกลม (ค่าศักย์ไฟฟ้าคูณกับค่ากระแส) ตามสมการ

$$I = KV(V - V_c)$$

เมื่อ V_c คือ ค่าศักย์เริ่มแรก และ K เป็นค่าคงที่ จะพบว่าหลักการทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน การประมาณของไวท์ จะทำให้ได้ ที่ค่าศักย์สูงๆ ความเร็วในการเคลื่อนย้ายจะเป็นอิสระ ไม่ขึ้น

กับค่าศักย์ เมื่อฝุ่นผง หรือขี้เถ้าในนี้มีค่าสภาพต้านทานสูง ค่ากระแสจะถูกลดทอนลง เนื่องจากเกิดการไอออนในเซชันย้อนกลับ (Back Ionisation) ดังจะได้อธิบายต่อไป ส่วนค่า $E_c E_o = V^2/d$ จะเป็นการประมาณค่าที่ใกล้เคียงกว่า แต่ทั้งสองหลักการก็สามารถหาค่า ประสิทธิภาพได้จากตัวแปรที่สามารถวัดได้

2.3.4 ความสมบูรณ์ของสมการของคอสท์

จากในหัวข้อที่แล้ว จะพบว่าสมการของคอสท์ จะประมาณค่าประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนที่ค่าสูงสุด ซึ่งในความเป็นจริงอาจจะต่ำกว่าที่คำนวณได้ค่อนข้างมาก โดยมีรูปสมการทั่วไปคือ

$$E = 1 - \exp(-\alpha W_o)$$

แต่เนื่องจาก ค่าความเร็วสัมพัทธ์ในการเคลื่อนตัวของอนุภาค (Effective Migration Velocity) จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากสมการที่ 2.3.13 และจะขึ้นอยู่กับ ความเร็วของก๊าซ ที่เป็นแบบเชิงเส้น ความสมบูรณ์ของสมการของคอสท์ ในรูปสมการที่ 2.3.17 เมื่อนำค่ามาวาดกราฟ ซึ่งจะได้กราฟเป็นเส้นตรง โดยมีความชันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาตรของอนุภาคซึ่งเรียกเส้นกราฟนี้ว่า เส้นสมรรถภาพ (Performance Line)

แต่เนื่องจากสมการที่ 2.3.17 เกิดขึ้นมาจากการประมาณค่าต่างๆ ดังนั้นค่าที่คำนวณได้ จึงแสดงค่าที่ได้อยู่ในรูปค่าทั่วไป หรืออย่างกว้างๆ เท่านั้น โดยสมการ 2.3.17 ประมาณค่าดังต่อไปนี้

(ก) ความหนาแน่นของอนุภาค ในบริเวณพื้นที่หน้าตัดของตัวเครื่อง มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งในความเป็นจริงจะเกิดในบริเวณที่ไม่มีฝุ่นอยู่เลย คือบริเวณใกล้กับขั้วปล่อยประจุ และจะมีขนาดกว้างขึ้นมีก๊าซเคลื่อนที่ผ่าน

(ข) คิดว่าอนุภาคทุกอนุภาค มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันหมด

(ค) ทุกอนุภาคเคลื่อนที่ได้ระยะทาง $w d t$ เท่านั้น จะไม่เกิดการปลิวกลับเข้ามาในทางเดินของก๊าซอีกครั้งหนึ่ง

ซึ่งเมื่อศึกษาภาพถ่าย บริเวณพื้นผิวที่เป็นตัวเก็บฝุ่น ฝุ่นที่มีค่าต้านทานสูง จะเกิดปลิวหลุดกลับเข้ามาในทางเดินของก๊าซอีกครั้งหนึ่ง ในเวลาเพียง 2-3 วินาที ที่ไปเกาะติดกับแผ่นรวบรวม

สมการของคอสท์ สามารถจะใช้ทำนาย ขนาดของเครื่องตกตะกอนฝุ่นได้ เมื่อกำหนดค่าประสิทธิภาพของเครื่องที่ต้องการไว้ก่อน โดยเปลี่ยนรูปสมการใหม่เป็น

$$1 - \Sigma = \exp[-(\omega_n \omega)^k] \tag{2.3.18}$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่อยู่ที่ 0.5 และ ω_n มีค่าที่เทียบเท่ากับความเร็วในการเคลื่อนตัว แต่เป็นค่าที่คำนวณสำหรับผลที่ไม่เป็นอุดมคติ และสามารถเปลี่ยนแปลงไปกับ สภาพด้านทานของแผ่น, ขนาดของอนุภาค ฯลฯ เช่น แผ่นที่มีค่าสภาพด้านทานสูงมาก อาจมีค่าเท่ากับ 12-15 เมตรต่อวินาที และถ้ามีความต้านทานต่ำ ก็จะมีค่าเป็น 60-70 เมตรต่อวินาที โดยถึงแม้ว่า สมการของคอชท์ซ์ ในรูปที่ 2.3.18 ไม่ได้มาจากทฤษฎี แต่มาจากการสังเกตผลของการทดลอง ซึ่งก็ให้ผลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงสูง

2.3.5 ผลของคุณสมบัติของแผ่นต่อการดักจับ

ปัจจุบันวิธีที่เหมาะสมที่สุด ที่จะหาขนาดของเครื่องดักจับฝุ่น คือการทำารทดลองที่หลากหลาย ขนาด แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกัน โดยใช้ทั้งวิธีใช้ ω_n หรือ เส้นสมรรถภาพ เป็นเบื้องต้น ทฤษฎีของคอชท์ซ์ เพียงแต่ทำนายขนาดของรัศมีของอนุภาค และค่าคงที่ไดอิลคตริก ที่มีผลต่อความสามารถในการดักจับเท่านั้น แต่จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติอื่นๆ ของแผ่น ก็มีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน เช่น พบว่าแผ่นที่มีค่าสภาพด้านทานสูง ต้องการขนาดเครื่อง หรือพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคที่มีค่าสภาพด้านทานปานกลาง หรือทั่วๆ ไป

แผ่นที่มีค่าสภาพด้านทาน ประสิทธิภาพในการจับที่ ค่าศักดาที่กำหนด กับ ความศักดาสูงสุดที่ยังคงค่าไว้ได้โดยไม่เกิดสภาพเรืองแสง หรือ การอาร์ค (Arc) ขึ้น จะมีค่าลดลง ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้ ช่วยให้เข้าใจปรากฏการณ์การพังทลายไฟฟ้าของอากาศ (Electrical Breakdown) ที่เกิดขึ้นกับแผ่นที่ติดอยู่ที่ตัวจับ ซึ่งเรียกชื่อ เฉพาะว่า การไอออไนเซชันย้อนกลับ (Back Ionisation) ซึ่งจะอยู่ในหัวข้อถัดไป

การวัด การแจกแจงขนาดของอนุภาคและค่าสภาพด้านทาน สามารถบอกถึงความยากง่ายที่จะสามารถรวบรวมฝุ่นได้ แต่ไม่ได้บอกถึงขนาดของตัวเครื่องได้ จะเห็นได้ชัดว่าแผ่นบางประเภทเกาะติดกับตัวรวบรวมได้แน่นกว่าบางชนิด และ อาจที่จะสามารถปลิวกลับมาในทางเดินของก๊าซได้อีก แต่ก็ยังไม่สามารถพิสูจน์ถึง ความสามารถในการดักจับของแผ่นชนิดนี้ได้

2.3.6 การไอออไนเซชันย้อนกลับ (Back Ionisation)

การไอออไนเซชันย้อนกลับเป็นคำที่อธิบายปรากฏการณ์การพังทลายไฟฟ้า (Electrical Breakdown) ของอากาศ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเกิดฝุ่นที่มีประจุ ไปเกาะติดบนผิวรวบรวม ที่มี

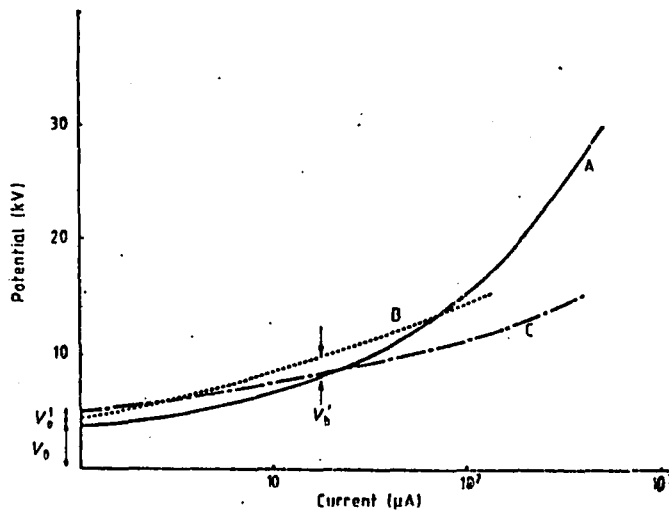
ศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ เป็นชั้นๆ ซึ่งจะมีความสำคัญอย่างมาก ทั้งการรวบรวมฝุ่นที่มีค่าสภาพต้านทานสูง ในเครื่องดักจับ และในขบวนการเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตย์

ค่าของการพังทลายไฟฟ้าของผง หรือฝุ่นที่ไปเกาะเป็นชั้นๆ อยู่ในช่วง 10^6 และ 10^7 โวลต์ต่อเมตร ค่าสนามที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น สามารถประมาณได้จากค่าสภาพต้านทาน และค่าความหนาแน่นกระแส J โดยใช้กฎของโอห์ม

$$E = \rho J \tag{2.3.19}$$

เมื่อ ρ คือค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และ J คือค่าความหนาแน่นของกระแส ค่าความหนาแน่นกระแสต่างๆ ไป ที่แผ่นรวบรวมของเครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์คือ 10^{-4} แอมป์ต่อตารางเมตร ดังนั้นค่าสนามที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น สามารถที่จะทำให้เกิดการพังทลายไฟฟ้าได้ เมื่อสภาพต้านทาน มีค่าเกิน $10^{10} - 10^{11}$ โอห์ม-เมตร

เมื่อเกิดการคายประจุในชั้นของฝุ่น จะเกิดไอออนบวกและอิเล็กตรอนขึ้น ถ้าคิดว่าเครื่องตก



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสและศักย์ไฟฟ้าในการคายประจุจากจุดไปยังระนาบ เมื่อ A คือ ไม่มีการเกิดการไอออไนเซชันย้อนกลับ และ B เกิดการไอออไนเซชันปานกลาง C เกิดการไอออไนเซชันมากที่สุด V_B และ V_C แทนศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมชั้น ฉนวน b และ c ณ. จุดที่เริ่มเกิดการไอออไนเซชันย้อนกลับ V_A คือ ศักย์เริ่มต้นเมื่อเกิดการไอออไนเซชันย้อนกลับ ขณะยังไม่เกิดขึ้นฉนวน

ตะกอนใช้ค่าศักดาที่เป็นลบ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นตรงไปยังตัวรวบรวม และ ไอออนบวก จะถูกดูดซับที่ว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ตรงไปยังขั้วศักดาสูงที่เป็นตัวจ่ายให้กับเครื่อง ไอออนบวก เหล่านี้ก็ประพฤติตัวเหมือน เป็นการคายประจุของฟูล ดังนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องลดลง เมื่อ เกิดการไอออนในเซชันย้อนกลับในระบบ กระแสของวงจรมายนอก จะเพิ่มขึ้นอย่างมากมาช (ไอออนบวกเคลื่อนที่ไปยังเส้นลวด ซึ่งมีขั้วเหมือนกับกระแส ในขณะที่ไอออนลบ เคลื่อนที่ไปยังทิศ ตรงข้ามและสนามไฟฟ้า เนื่องจากประจุบวกในบริเวณช่องว่าง จะไปเพิ่มค่ากระแสในซีกลบ)

จากรูป 2.7 เป็นการเปรียบเทียบ กระแสกับศักย์ไฟฟ้า จุดต่อจุด ในการคายประจุแบบ วงกลม เมื่อใช้แผ่นโลหะที่มีความสะอาด และพิจารณาการเกิดการไอออนในเซชันแบบย้อนกลับ ที่ เกิดขึ้นบนระนาบ เมื่อพิจารณาการไอออนในเซชันแบบย้อนกลับ กระแสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ค่า $V(V-V_c)$ เมื่อ V_c คือ ค่าศักย์เริ่มแรกที่มีลักษณะเป็นวงกลม แต่เมื่อเทียบกับการไอออนใน เซชันย้อนกลับ จะไม่เป็นเส้นตรงตามความสัมพันธ์ดังกล่าว

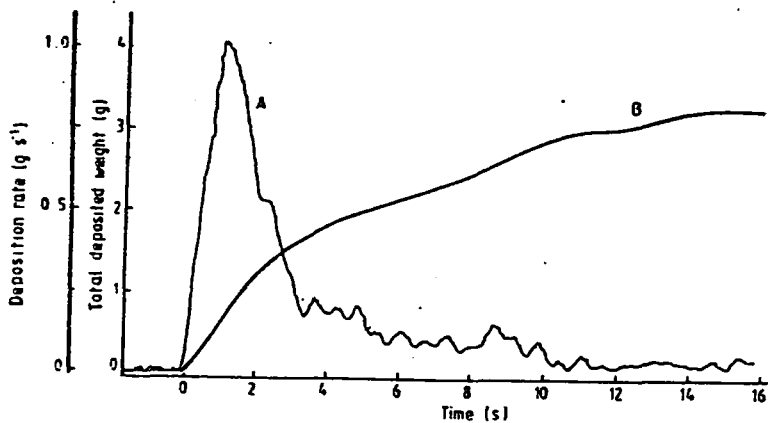
ครอส (Cross) ได้ศึกษาค่ากระแสที่ไหล ระหว่างที่เกิดการไอออนในเซชันย้อนกลับ เมื่อปี ค.ศ. 1985 พบว่า เมื่อวัดกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากการคายประจุเป็นวงกลม โดยใช้ฮอสซิลโล สโคป ค่าที่ได้จะมีค่าเป็นสัญญาณเข้าไปเข้ามา โดยมีรูปแบบเฉพาะที่แน่นอน แต่อยู่บนค่ากระแสที่คงที่ สำหรับรูปร่างของตัวเครื่องแต่ละแบบ กระแสคงที่ที่วัดได้ จะเป็นสัดส่วน กับค่ากระแสรวมทั้งหมด (กระแสทั้งหมด หมายถึงค่ากระแสที่วัดโดยใช้โวลต์มิเตอร์) สัญญาณรูปคลื่นที่วัดได้นั้น สามารถนำ มาอธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนใกล้ๆ กับขั้วศักย์สูงได้ เมื่อค่ากระแสเพิ่มขึ้น เนื่อง จากการไอออนในเซชันย้อนกลับ จะทำให้ความถี่ของสัญญาณนั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสรวมทั้ง หมดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่ที่ค่าการไอออนในเซชันย้อนกลับมากๆ กลับทำให้ค่ากระแสคงที่เพิ่มขึ้นเพียง 2-3 % เท่านั้น ซึ่งสามารถตีความหมายออกมาได้ว่า กระแสรวมทั้งหมดที่เกิดขึ้นระหว่างการไอออน ในเซชันย้อนกลับนั้น เกิดขึ้นเนื่องมาจาก การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนใกล้ๆ กับขั้วศักย์สูง การ เพิ่มขึ้นนี้ เชื่อว่าน่าจะเป็นผลมาจาก การลดลงของประจุที่มีค่าเป็นลบ ที่อยู่ในที่ว่างระหว่างขั้วทั้งสอง โดยการเกิดไอออนบวกขึ้น ในชั้นการไอออนในเซชันย้อนกลับ ซึ่งการวัดไม่สามารถ ที่จะวัด ค่าไอออนบวกได้โดยตรง เนื่องจากเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาค ที่มีค่าความคล่องตัวสูงมาก และ อยู่ในสนามไฟฟ้าที่มีค่าแรงมากด้วย ฮอสซิลโลสโคปจะจับการเกิดการพังในแต่ละครั้ง ในชั้นการ ไอออนในเซชันย้อนกลับได้ ก็ต่อเมื่อ เกิดการไหลของกระแสที่มีความหนาแน่นสูง ผ่านชั้นที่เหมือนซี ทรั๊ว ที่มีความต้านทานสูง ทำให้ค่ากระแสมีความสัมพันธ์อย่างมากกับรูปสัญญาณที่เกิดขึ้น ในกรณีนี้ ค่ากระแสที่ไหลผ่านชั้นฟูลหรือเข้าไปยังขั้วที่มีศักย์สูง จะสามารถสังเกตได้ จากการเกิดการเรือง แสงน้อยๆ ในช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

ผลที่เกิดขึ้นนี้สามารถที่จะชี้ให้เห็นว่า ค่ากระแสที่เกิดขึ้น ระหว่างการไอออนในเซชันย้อนกลับ ไม่สามารถที่จะทำการวัดได้ เนื่องจากเกิดจากประจุบวก แต่จะสามารถประมาณค่าได้ จากการ

วัดเปอร์เซ็นต์ การเกิดการไอออไนเซชันย้อนกลับ จากหัววัดไฟฟ้าสถิตย์

การสังเกต การคายประจุแบบการไอออไนเซชันแบบย้อนกลับ ในชั้นฉนวน ทำได้โดยการใช้วิธี Image Intensifier ซึ่งใช้หลักการที่ว่า การก่อดิวของการเรืองแสงบริเวณพื้นผิวและจุดสว่าง ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่วพื้นผิว การปล่อยแสงจะมีความสัมพันธ์ กับการหลุดตัวของฝุ่นเข้ามา ในทางเดินของก๊าซอีกครั้งหนึ่ง จุดสว่างจะแสดงแทนการพุ่งตัวของเม็ดฝุ่น ที่หลุดออกมาจากพื้นผิวและ การเรืองแสงจะเกิดขึ้นกับอนุภาคต่างๆ ตัวที่เคลื่อนที่ การเคลื่อนตัวเช่นนี้ ในชั้นทำให้ยากมาก ที่จะได้ผลจากฝุ่นผงจริงๆ ซึ่งในการศึกษาจะใช้ กระดาษชำระหรือรูที่เล็กมาก ในของแข็งที่เป็นฉนวน เป็นแบบในการศึกษาชั้นของการเกิดการไอออไนเซชันย้อนกลับ

ประสิทธิภาพในการจับฝุ่นจะลดลง เมื่อเกิดการไอออไนเซชันย้อนกลับขึ้น จากรูป 2.8 แสดงให้เห็นถึง มวลของเม็ดฝุ่นที่เกาะติดอยู่บนแผ่นจับ เมื่อใช้ฝุ่นโพลีเมอร์ที่มีค่าสภาพต้านทานสูง พ่นผ่านเข้าไปจากจุดที่มีค่าศักย์สูง ตรงไปยังแผ่นจับ ตามการคายประจุเป็นวงกลม อัตราส่วนของการเกาะติดจะลดลงอย่างมาก หลังจาก 2-3 วินาทีแรกของการเกาะติด และการลดลงนี้จะทำ ประสิทธิภาพของเครื่องลดลงด้วย ซึ่งสามารถนำไปเทียบกับการเริ่มต้นการเกิดของการไอออไนเซชันย้อนกลับด้วย



รูปที่ 2.8 อัตราการติดของฝุ่น (A) และ การติดฝุ่นโดยรวมทั้งหมด (B) เมื่อเวลาผ่านไป

2.3.7 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฝุ่น

การไอออไนเซชันแบบย้อนกลับจะยิ่งมีค่ามากขึ้น เมื่อสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของฝุ่นมีค่า

สูงทำให้สามารถเทียบสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของฝุ่นว่า เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพ หรือ วิธีการทำงานของเครื่องได้ แต่ความสัมพันธ์นี้ก็ยังไม่ได้มีการทดลองอย่างจริงจังจึงมีวิธีการง่ายๆ 2 แบบที่ใช้วัดค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้า คือ วิธีแรก ใส่ฝุ่นในพื้นที่ปิด ที่มีการควบคุมสภาพภายนอกด้วยขั้วไฟฟ้าขนานกัน 2 ขั้ว ที่ระยะห่างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ใส่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 2-3 กิโลโวลท์ ที่ขั้วทั้งสองจะทำให้เกิดกระแส I ไหลผ่านตัวฝุ่น วัดค่าที่ได้แล้วนำไปแทนในสมการ

$$\rho = AV/Id \tag{2.3.20}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า, d คือ ระยะห่างระหว่างขั้ว

วิธีที่ 2 ใช้วิธีการวัดค่าที่เกิดขึ้นระหว่างการคายประจุเป็นวงกลม ศักย์ที่พื้นผิว V_u ของชั้นฝุ่น ที่เกาะอยู่ด้วยความหนา d จะวัดได้ เมื่อทราบความหนาแน่นการแส J

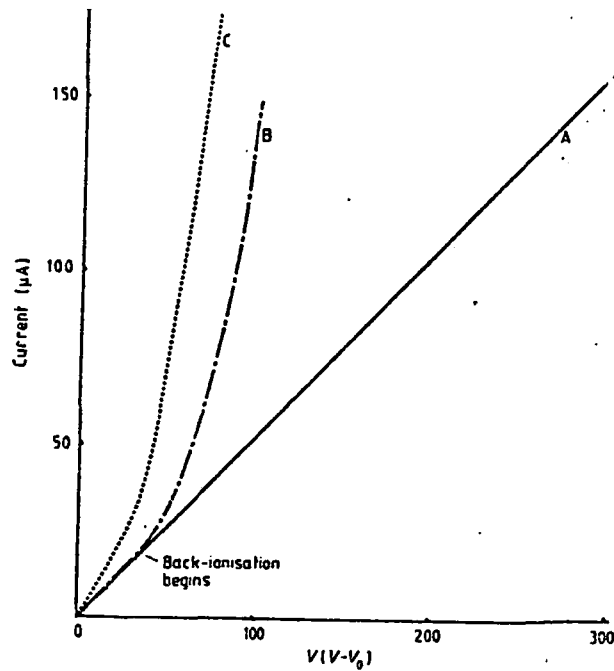
$$\rho = V_u/dJ \tag{2.3.21}$$

การวัดศักย์ที่พื้นผิวทำได้ โดยใช้หัววัดวัด หรือ สังเกตการเคลื่อนไปจะหาค่าเริ่มต้นของ Corona Voltage ทั้ง 2 วิธี จะเกิดปัญหาคือ เมื่อเกิดการไอออไนเซชันย้อนกลับ การไอออไนเซชันย้อนกลับจะทำให้เกิดไอออนเพิ่มมากขึ้น ก็คือ มีกระแสไหลได้มากยิ่งขึ้น ทำให้สภาพต้านทานสัมพันธ์ของชั้นฝุ่นมีค่าลดลง ถึงแม้ว่า ชั้นฝุ่นเองนั้นจะมีค่าสภาพต้านทานที่สูงมากก็ตาม การไอออไนเซชันย้อนกลับจะทำให้เกิดกระแสไหลเพียงเล็กน้อยได้ด้วย เมื่อชั้นฝุ่นมีความบางมากๆ ปัญหานี้ทำให้เกิดขีดจำกัดชั้น เมื่อวัดฝุ่นที่เป็นลักษณะตัวนำและมีค่าการไอออไนเซชันย้อนกลับต่ำ

แต่ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของฝุ่น มีความจำเป็นต้องใช้เพื่อทำนายแนวโน้มของการเกิดการไอออไนเซชันย้อนกลับ อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ดังกล่าวระหว่างความต้านทานไฟฟ้า และการไอออไนเซชันย้อนกลับ จะถูกทำให้เข้าใจได้ด้วย ความสัมพันธ์ของ กระแสและศักย์ไฟฟ้าของการคายประจุแบบวงกลม เพื่อจับค่าการเกิดการไอออไนเซชันย้อนกลับแทน

ขณะยังไม่เกิดการไอออไนเซชันย้อนกลับ กระแสที่เกิดขึ้นขณะคายประจุเป็นวงกลม จะเป็นสัดส่วนกับค่า $V(V-V_0)$ เมื่อ (V_0 คือ ค่า Corona Voltage เริ่มแรก) ดังนั้นกราฟระหว่าง I กับ $V(V-V_0)$ จะเป็นเส้นตรง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เบนออกไปจากเส้นตรงนี้ ก็คือ ค่าการไอออไนเซชันย้อนกลับที่เกิดขึ้นนั่นเอง ซึ่งจะทำให้เกิดความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้า ระหว่าง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้าของ การเกิดไอออไนเซชันย้อนกลับ กับ การไม่เกิดไอออไนเซชันย้อนกลับขึ้น ดังรูปที่ 2.9

ถึงแม้ว่า การเกิดไอออไนเซชันย้อนกลับ มีบทบาทสำคัญในความสามารถในการดักจับของฝุ่นชนิดต่างๆ แต่ขณะนี้ยังไม่มีการเขียนออกมาเป็นสูตรหรือความสัมพันธ์ที่แน่นอน



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ศักย์ไฟฟ้าและกระแสในการคายประจุแบบจุดไปยังระนาบ เมื่อ A ไม่เกิดการไอออไนเซชัน B เกิดการไอออไนเซชันปานกลาง และ C มากที่สุด

2.3.8 ผลของแรงทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Force)

หลักในการออกแบบหลักอากาศพลศาสตร์ของเครื่องดักจับฝุ่นขนาดใหญ่คือ

- (ก) แรงดันอากาศรวมที่ตกลงเมื่อผ่านตัวเครื่องควรมีค่าน้อยที่สุด
 - (ข) ก๊าซจะต้องถูกลดความเร็วจากความเร็วฝุ่น (Dust Velocity) (ปกติมากกว่าหรือเท่ากับ 15 เมตรต่อวินาที) เป็นความเร็วของเครื่องดักจับ (1-2 เมตรต่อวินาที)
 - (ค) ฝุ่นที่ถูกลดความเร็วจะต้องถูกกระจายเข้าไปในภาชนะรวบรวม (Collection - Chamber) (ในการประมาณขนาดเครื่องดักจับ เราจะสมมติว่าก๊าซมีการกระจายสม่ำเสมอครอบคลุมพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์)
 - (ง) การไหลของก๊าซที่กั้นภาชนะรวบรวมจะต้องมีค่าน้อยที่สุด
 - (จ) ก๊าซจะต้องค่อยๆ ถูกเร่งออกจากภาชนะรวบรวม
- มีความจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะต้องหาค่าความเร็วของก๊าซสม่ำเสมอ เนื่องจากความเร็วสัมพันธ์กับการเคลื่อนย้ายของอนุภาคเป็นฟังก์ชันของอัตราการใช้ของก๊าซ (โดยบางที่อาจจะเนื่อง

มาจากการกลับเข้าไปในทางเดินของก๊าซอีกครั้ง ซึ่งก็เป็นฟังก์ชันของความเร็วก๊าซด้วย) ก็จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลงที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบ ซึ่งทั้งจากทางทฤษฎีและผลจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของระบบนั้นจะมีค่ามากยิ่งขึ้น ถ้าอัตราการไหลเป็นแบบไม่เป็นระเบียบพอประมาณ เครื่องดักจับฝุ่นจะมีประสิทธิภาพมากกว่าที่หาได้จาก สมการของคอยท์ซ์ (ซึ่งสมมติให้ มีความไม่เป็นระเบียบสูง) หรือ มีค่ามากกว่าที่เคยมีการบันทึกไว้เมื่อใช้งานจริง เหตุผลที่ทำให้เกิดเหตุการณ์เช่นนี้ ยังไม่ได้มีการศึกษาอย่างจริงจัง แต่ได้มีการตั้งสมมติฐานไว้ว่า เพราะเกิดจากการกลับเข้ามาของก๊าซที่ผ่านออกไปแล้ว

การใช้แบบทดลองในการออกแบบตัวเครื่อง ก็ยังไม่ได้ผลที่ตรงกับความเป็นจริงนักเนื่องจากในการทำงานจริงๆ จะมีลมไอออน (ซึ่งได้กล่าวโดยละเอียดมาแล้ว) ซึ่งมีความเร็วประมาณ 1-2 เมตรต่อวินาที รวมอยู่ด้วย ทำให้ผลการศึกษาดังกล่าวแบบไม่ตรงกับความเป็นจริง รวมทั้งรูปแบบการไหลของก๊าซก็ยิ่งขึ้นกับรูปร่างของตัวที่ปล่อยประจุอีกด้วย

2.3.9 ผลของการใส่ศักย์ไฟฟ้า

ในเครื่องดักจับฝุ่นขนาดใหญ่ ที่ทำงานที่ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และที่ความดันบรรยากาศจะต้องให้ศักย์กลบที่มีค่าสูงมากกับเส้นลวด เพราะจะไม่ทำให้เกิดการอาร์คมากเท่าใดนัก ส่วนในเครื่องที่มีขนาดเล็กไม่ค่อยจะมีปัญหาเรื่องขนาด ซึ่งต้องการประสิทธิภาพสูงก็ใช้ศักย์กลบที่มีค่าสูงมาก เพราะจะไม่ทำให้เกิดก๊าซไอออน (เนื่องจากประจุรวมตัวกับก๊าซออกซิเจน) รวมทั้งในบางกรณีศักย์ที่ทำให้เกิดการอาร์คจะมีค่าสูงมากกว่าการใช้ศักย์กลบ (เช่นในกรณีที่อุณหภูมิและความดันมีค่าสูงมาก) ในทางทฤษฎี ประสิทธิภาพของการจับจะขึ้นอยู่กับกำลังสองของศักย์ไฟฟ้าที่ให้เข้าไป และการทำงานจะดีที่สุดหรือดีขึ้นไปอีก เมื่ออิงให้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ในทางปฏิบัติพบว่ารูปคลื่นที่ออกมาจากภาคเรียงกระแสและกรองกระแส ที่ไม่เรียบจะให้ผลที่ดีกว่าแหล่งจ่ายไฟที่ให้ค่าเรียบสนิท คือ ช่วงเวลาการสวิตช์นานๆ นั้นจะทำให้เวลาการสปาร์คหมดไป และ ที่แหล่งจ่ายไฟสลับยังไม่ได้แสดงนั้น จะทำให้ได้ค่าศึกษามากกว่า ที่กรองง่ายกว่าไม่ต้องหาอุปกรณ์สนับสนุนการกรองอีกทีหนึ่ง แต่ที่ค่าศักย์สูงมากๆ ย่อมจะต้องเกิดการสปาร์คเป็นธรรมดา จึงต้องมีการเกิดการสปาร์คบ้าง แต่ถ้ามากเกินไปก็จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องลดลง เครื่องขนาดใหญ่ปกติจะจำกัดให้การสปาร์คเกิดขึ้นได้ประมาณ 100 ครั้งต่อนาที แต่ถ้าในกรณีที่ผู้มีความรู้ด้านงานสูงพบว่า การไอออนในเซชันย้อนกลับที่ค่าศักย์สูงๆ จะทำให้ประสิทธิภาพลดลง โดยการเพิ่มศักย์ให้สูงมากขึ้นไปอีก ไม่สามารถช่วยให้ประสิทธิภาพสูงกว่านี้ไปได้ ในกรณีเช่นนี้การใช้ศักย์ต่ำกว่าศักย์ที่จะทำให้เกิดการไอออนเซชันย้อนกลับ จะให้ผลดีกว่า

การสปาร์คที่เกิดขึ้นในระบบ ขึ้นกับความหนาของขนาดต่างๆ ที่อยู่บนแผ่นรับ ซึ่งถือเป็นขบวนการ

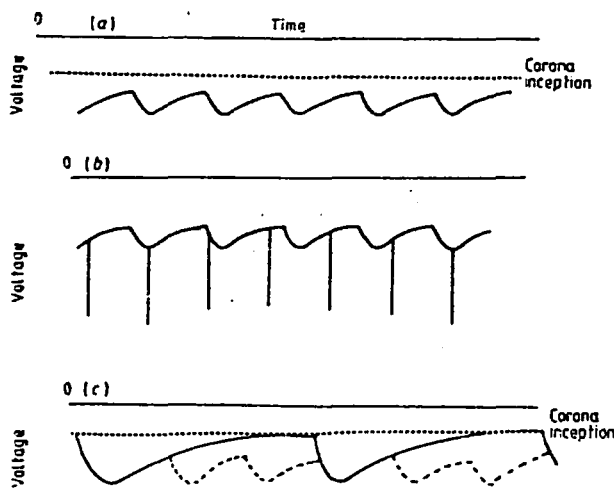
การที่ไม่สามารถทำนายได้ (Random Process) ดังนั้นความน่าจะเป็นที่การสปาร์คจะเกิดขึ้นในการคายประจุเป็นวงกลมจะเพิ่มขึ้น เมื่อเส้นลวดมีความยาวเพิ่มขึ้น สามารถแสดงให้เห็นถึงค่าศักดาสูงสุดของเครื่องที่มี n ช่อง, V_n ในรูปของศักดาสูงสุดใน 1. ช่องได้เป็นสมการ

$$V_n = V_1 - \ln n/b \tag{2.2.22}$$

โดย b คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการคำนวณมีค่าอยู่ที่ 1

ดังนั้นจากสมการจะเห็นว่า จะได้ผลคืออย่างไร ถ้าชอยเครื่องออกเป็นหลายๆ ช่องโดยแต่ละช่องหรือหน่วย มีศักดาที่มาจ่ายให้ไม่เท่ากัน ซึ่งคิดได้อีกในแง่หนึ่งว่า ถ้ามีเพียงตัวเดียวก็จะกินพลังงานทั้งหมดเพียงตัวเดียวจะทำให้เกิดการอาร์คได้สูงขึ้น จำนวนแหล่งจ่ายไฟที่จะต้องจ่ายให้ระบบที่แบ่งเป็นช่องๆ นั้น จะต้องพิจารณาถึงความสามารถที่มันจะส่งถ่ายพลังงานที่อยู่ในรูปกระแสที่จะเปลี่ยนไปเป็นกำลังงานให้แก่เครื่องจ่ายไม่มีการสูญเสียศักย์ไฟฟ้า

ปัจจุบันได้มีการพบว่า ประสิทธิภาพจะดีขึ้นได้ ถ้าใส่ศักย์ไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณ โดยถ้ามีรูปคลื่นสัญญาณเล็กๆ เกาะไปบนไฟตรง ก็จะทำให้ได้ค่าศักดาที่มีค่ามากกว่า โดยไม่เกินค่าสปาร์ค และทำให้การประจุนภาคดีขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังจะได้ค่าศักดาสูงสุด โดยไม่ต้องใช้ค่า



รูปที่ 2.10 รูปแบบการกำเนิดสัญญาณ (ศักย์ไฟฟ้ากับเวลา) ³

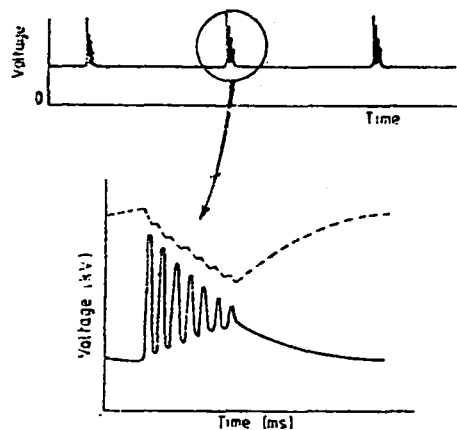
- a) แบบดั้งเดิมใช้แรงดันความถี่ 50/60 เฮิรต์
- b) Research Cottrell Pulsed Wave Form
- c) SPC

กระแสสูง ทำให้สามารถจะคงค่ากระแส ให้ต่ำกว่าค่ากระแสของการไอออไนเซชันย้อนกลับ โดยความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาคไม่ลดลง

เมื่อทำการทดสอบกับลูกคลื่นหลายๆ แบบ จะพบว่า ประสิทธิภาพจะสูงขึ้นตามค่า ω_n (จากสมการ 2.3.18) โดยคูณด้วยตัวแปรที่มีค่าน้อยๆไปจนถึง 2.5 ซึ่งทำให้ค่าลดลงถึง 85% แต่การปรับปรุงประสิทธิภาพจะใช้ได้เฉพาะฝุ่นที่มีความต้านทานปานกลาง-สูง แต่ฝุ่นที่มีคุณสมบัติเช่นนี้จะจับยาก และต้องใช้ในการปรับปรุงเป็นอย่างมาก

เอฟ.เอล ชนิคท์ (F.L.Schmidt) ได้พัฒนาระบบ โดยใช้สัญญาณที่กว้าง 50-200 ไมโครวินาที จะใช้ความถี่ 25-400 ลูกต่อวินาที สำหรับไฟตรงที่มีค่าน้อยกว่าค่าศักดาโคโรนา โดยมีค่าสูงสุดที่ค่า 90 กิโลโวลท์ ผลการทดสอบโดยใช้ ω_n ตัวแปร 1.2 สำหรับฝุ่นที่ไม่เกิดการไอออไนเซชันแบบย้อนกลับ, และใช้ตัวแปร 2 สำหรับฝุ่นที่ไอออไนเซชันได้ ผลการวิจัยของคอตเทรล (Cottrell, 1997) อ้างว่า ถ้าใช้ตัวแปร 2.5 กับฝุ่นที่มีค่าความต้านทานสูง และใช้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดต่ำๆ เกาะไปบนสัญญาณเรียบ (รูปที่ 2.10 (b)) ทำให้เกิดการคายประจุที่สม่ำเสมอที่ขั้วศักย์สูง และกำจัดความหนาแน่นกระแสสูงๆ ในบริเวณแคบๆ ลง สตอมแบร์กและลุนควิสท์ (Stomberg and Lundquist, 1983) แสดงให้เห็นว่า ถ้าใช้สัญญาณความถี่คลื่นวิทยุเกาะไปบนสัญญาณไฟตรงจะทำให้การกระจายของกระแสดีขึ้น

มีสึสุดา (Masuda, 1975) ได้ประกาศว่า สามารถทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นสูงมากได้ด้วยการใช้รูปคลื่นสัญญาณเป็นรูปสี่เหลี่ยมเล็กๆ (Square Wave) ให้กับเครื่องดักจับฝุ่นแบบ 3 ขั้ว โดยมีคาบช่วงเวลาขาขึ้น 5 ไมโครวินาที และคาบช่วงเวลาขาลงน้อยกว่า 500 ไมโครวินาที



รูปที่ 2.11 MPC ³

ที่มีความกว้าง 10-10,000 ไมโครวินาที ด้วยค่าศักย์ 40 กิโลโวลต์ และมีความถี่ 5-10,000 ลูกต่อวินาที ซึ่งมีผลต่อกระแสเหมือนเดิม คือ การกระแสม้าเสมอกัน

โพลอ (Porle, 1985) ได้ทำการเปรียบเทียบการให้พลังงาน 2 ระบบ ระบบแรกคือ SPC หรือ Semipulse Concept ดังรูปที่ 2.10 (c) ซึ่งเส้นประเป็นวิธีเดิม โดยรูปคลื่นแบบเดิมนั้นใช้ไฟสลับ 50-60 เฮิร์ต จะถูกนำมากรอง จะเห็นว่า ลูกคลื่น 1 ใน 3 ของคลื่นแบบเดิมจะผ่านไปไม่ได้ และค่ากระแสเฉลี่ยลดลงเหลือ 1 ใน 3 ของค่าเดิม ผลก็คือสามารถประหยัดค่าพลังงานได้อย่างมาก รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพการจับได้สูงขึ้นเล็กน้อยอีกด้วย ข้อดีของการให้พลังงานแบบนี้ก็คือ สามารถใช้ร่วมกับสัญญาณแบบเดิมได้ โดยเพิ่มส่วนขยายเข้าไปเพียงเล็กน้อย ซึ่งเหมาะกับระบบที่มีปัญหาเรื่องการโอเวอร์โหลดในเซชันย้อนกลับและมีผู้ที่มีความต้านทานสูง เช่น แก้ว ก้าน เป็นต้น

อีกวิธีหนึ่งที่สามารถให้ปรับปรุงประสิทธิภาพได้ เรียกว่า MPC หรือ Multiple Concept ดังแสดงในรูปที่ 2.11

จากรูปจะเห็นว่า ประกอบไปด้วยสัญญาณสั้นๆ 8 ลูก ในแต่ละ 1 ช่วง โดยมีช่องว่างอยู่ในหน่วยของ มิลลิวินาทีระหว่างลูก จากระยะห่างที่น้อยขนาดนี้จะไม่เพียงพอที่จะทำให้เครื่องทำงานได้ ถ้าเกิดการสปาร์คขึ้น ดังนั้นลูกคลื่นแต่ละลูกจะต้องมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ และช่องว่างระหว่างคลื่นแต่ละลูก ก็ต้องมีขนาดเท่ากับช่วงเวลาที่ใช้เดินทางไปยังขั้วอีกขั้วหนึ่ง MPC จะเพิ่มของพุ่มที่มีสภาพต้านทานสูงกว่า 10^{11} โอห์มวินาที ทำให้ระบบทำงานได้ดีขึ้นไปอีก เมื่อสภาพต้านทานของพุ่มมีค่า 10^{13} โอห์มวินาที และมีค่าตัวแปร 2.5

จะเห็นว่าในกรณีทั่วไป การปรับปรุงที่เหมาะสมที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างลูกคลื่นที่มีค่าประมาณ 50-100 มิลลิวินาที เพื่อกำจัดการโอเวอร์โหลดในเซชันย้อนกลับที่จะเกิดขึ้นเมื่อเริ่มทำงาน

2.3.10 ผลเนื่องจากรูปแบบ หรือ รูปร่างลักษณะของตัวเครื่อง

ในเครื่องดักจับในรูปทรงกระบอก แก๊สและพุ่มทั้งหมดจะต้องผ่านส่วนทำความสะอาด ซึ่งทางเดินจะมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะทรงกระบอก มีเส้นลวดอยู่ภายในทรงกระบอก โดยเปิดหัวท้ายทรงกระบอก แต่อย่างไรก็ตามในเครื่องขนาดใหญ่ เราสามารถเพิ่มปริมาตรของทรงกระบอกได้ เพื่อลดค่าใช้จ่ายแทนที่จะใช้จำหน่ายหน่วยย่อยๆ ขั้วปล่อยประจุที่ใช้ก็มีหลายรูปแบบ เช่น เส้นตรง, สายพินโค้งกัน, ลวดหนาม หรือ มีลักษณะหลักเป็นรูปพินเลื้อย จากการทดลองพบว่าไม่มีแบบใดดีกว่ากัน และความแตกต่างระหว่างขั้วต่างๆ ก็ยังน้อยลงไปใหญ่ ถ้ามีพุ่มมาเกาะบริเวณขั้วระหว่างการทำงาน แต่จะพบว่า ลวดหนามหรือขั้วรูปพินเลื้อย จะยังคงสะอาดอยู่และยังสามารถปล่อยประจุให้อยู่ในช่วงปกติได้อยู่ แต่เส้นลวดเรียบเป็นปกติ จะเกิดการเรืองแสงตลอด

ค่าความยาวของเส้นทำให้ประสิทธิภาพลดลง ซึ่งในหลายๆ กรณี การออกแบบจะขึ้นอยู่กับแบบทาง เครื่องกลมากกว่าจะคำนึงถึงการทำงานทางไฟฟ้า

ไฮริช (Heinricg, 1956) ได้สังเกตเห็นว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะมีค่ามากกว่าเมื่อออกแบบให้ส่วนดักจับมีความกว้าง 350 มิลลิเมตร มากกว่าแบบเดิม คือ 250 มิลลิเมตร วิธีการทดสอบ คือ นำแผ่นรับประจุออก 1 แผ่น (1 ขั้วปล่อยประจุมีแผ่นรับประจุ 2 แผ่น นำออก 1 แผ่น ให้เหลือเพียง 1 แผ่น) แล้วทำการจัดเรียงเส้นใหม่ ทำให้ได้ว่า พื้นที่เพิ่มขึ้น 2 เท่า และเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ขั้วเป็น 2 เท่า แต่ค่ากระแสให้มีค่าเท่าเดิม พบว่า ประสิทธิภาพของการทำงานยังคงไม่เปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ถึงแม้ว่าจากสมการของคอสซ์จะทำนายไว้ว่า ประสิทธิภาพจะต้องมีค่าลดลง เนื่องจากพื้นที่ในการจับมีค่าลดลง แต่การศึกษาพบว่า การทดลองเช่นนี้จะทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ในการเคลื่อนที่ของอนุภาค มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะห่างระหว่างขั้วที่เพิ่มขึ้น และเหตุผลอื่นๆ อีกมาก รวมทั้งผลของความเข้มข้นของฝุ่นมากน้อยขนาดต่างๆ กัน ในการแพร่แบบไม่เป็นระเบียบ และอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่แรงกว่าเมื่อมีพื้นที่เพิ่มมากขึ้น

เพื่อที่จะนำข้อดีของการมีพื้นที่ระหว่างขั้วมากขึ้น จำเป็นที่จะต้องเพิ่มพื้นที่ว่าง ระหว่างขั้วปล่อยประจุเป็น 2 เท่าด้วย (นั่นคือที่ว่างระหว่างขั้วปล่อยประจุ 2 อัน ไม่ควรมีพื้นที่ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของพื้นที่ระหว่างแผ่นรับประจุ)

2.3.11 เครื่องดักจับแบบ 2 ตอน (Two-Stage Precipitator)

เครื่องดักจับแบบ 2 ตอนนั้นสามารถที่จะลดปัญหา การเกิดการไอออนเซชันย้อนกลับ ที่เกิดกับฝุ่นที่มีความต้านทานสูงได้ ในตอนที่หนึ่งเป็นส่วนให้ประจุ (Precharger Stage) จะทำการประจุให้แก่อนุภาค แต่ไม่มีการจับฝุ่นหรืออนุภาคนั้นๆ ในตอนที่สองมีการให้สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นรับประจุ 2 แผ่น แต่ไม่มีขั้วปล่อยประจุแบบโคโรนา ดังนั้นจึงมีการไหลของกระแสที่มาก ทำให้เกิดการไอออนเซชันย้อนกลับน้อยมากในทั้งสองตอน

แต่เครื่องดักจับแบบ 2 ตอน นี้มีปัญหาอยู่ 2 ข้อ คือ

(ก) มีประจุจำนวนจำกัดที่จะให้แก่ฝุ่นได้ เพราะสนามไฟฟ้าเนื่องจากฝุ่นมีค่าได้ไม่เกินค่าแรงดันพังของก๊าซ ในระบบขนาดใหญ่ข้อจำกัดนี้จะมีผลอย่างมาก

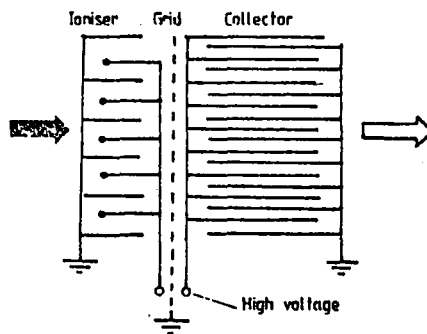
(ข) การเกิดไอออนเซชันย้อนกลับจะยังคงเกิดขึ้นได้ในตอนที่ 2 แม้ว่า จะไม่มีกระแสเนื่องจากการคายประจุเป็นวงกลมแล้วก็ตาม แต่จะมาจากประจุที่ฝุ่นนำติดตัวไปในตอนแรก

2.3.12 เครื่องดักจับฝุ่นขนาดเล็ก

เครื่องดักจับฝุ่นขนาดเล็ก ใช้ในการกรองควันหรือออกจากอากาศใน โรงแรม, บ้านรถยนต์ หรือส่วนกรองฝุ่นในเครื่องปรับอากาศ

พัดลมจะพัดอากาศในห้อง ให้ผ่านเข้ามาในบริเวณที่จะประจุ (Charging Zone) และอนุภาคจะถูกนำออกไป โดยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ที่กล่าวมาแล้ว เครื่องขนาดเล็กโดยปกติจะไม่มีขั้วรับประจุอยู่ในตอนเดียวกัน แต่จะแยกออกเป็นระบบ 2 ตอน ดังในหัวข้อ 2.3.12 โดยส่วนจับฝุ่นจะสามารถถอดออกเปลี่ยนได้ ดังนั้นเครื่องดักจับฝุ่นในห้องโดยทั่วไป จะประกอบด้วยส่วนประจุสั้นๆ ซึ่งเป็นเส้นลวดซึ่งเป็นแถวขนานกับแผ่นโลหะ และจะมีส่วนจับประจุที่ค่อนข้างจะยาว ประกอบไปด้วย แผ่นโลหะคู่ขนานสลับกันระหว่างแผ่น ที่มีศักย์สูงและศักย์ศูนย์

เครื่องดักจับในห้อง จะกำจัดฝุ่นออกไป แต่ยังมีกลิ่นอยู่ในอากาศ ดังนั้นการกรองควันบุหรี่จึงกรองเฉพาะควันเท่านั้น แต่กลิ่นบุหรี่ยังอยู่ และยังคงต้องแน่ใจว่าไม่เกิดก๊าซโอโซนขึ้นในระบบอีกด้วย โดยการควบคุม หรือ กำจัดโอโซนทำได้โดยการใช้ศักย์ไฟฟ้าชั้กบวก แต่ถึงแม้จะใช้วิธีนี้ก็ตาม อาจจะมีการปล่อยก๊าซโอโซนเกินขีดจำกัดได้ ถ้าใช้เครื่องดักจับนี้ในบริเวณที่ไม่มีการถ่ายเทอากาศ ก๊าซโอโซนและกลิ่นสามารถจะกำจัดไปได้ โดยใช้แผ่นกรองที่เป็นถ่านดักอยู่ในส่วนที่เป็นท่อนำอากาศขาออก



รูปที่ 2.12 เครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบ 2 ตอน ³

ในปัจจุบันพบว่า ประสิทธิภาพในการจับฝุ่นในเครื่องแบบ 2 ตอน ขนาดเล็ก จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ถ้าใส่ ขั้วแหลม (Grid) ที่มีศักย์ศูนย์ระหว่างตอนทั้งสอง โดยมีเหตุผลประกอบ 3 ข้อ คือ

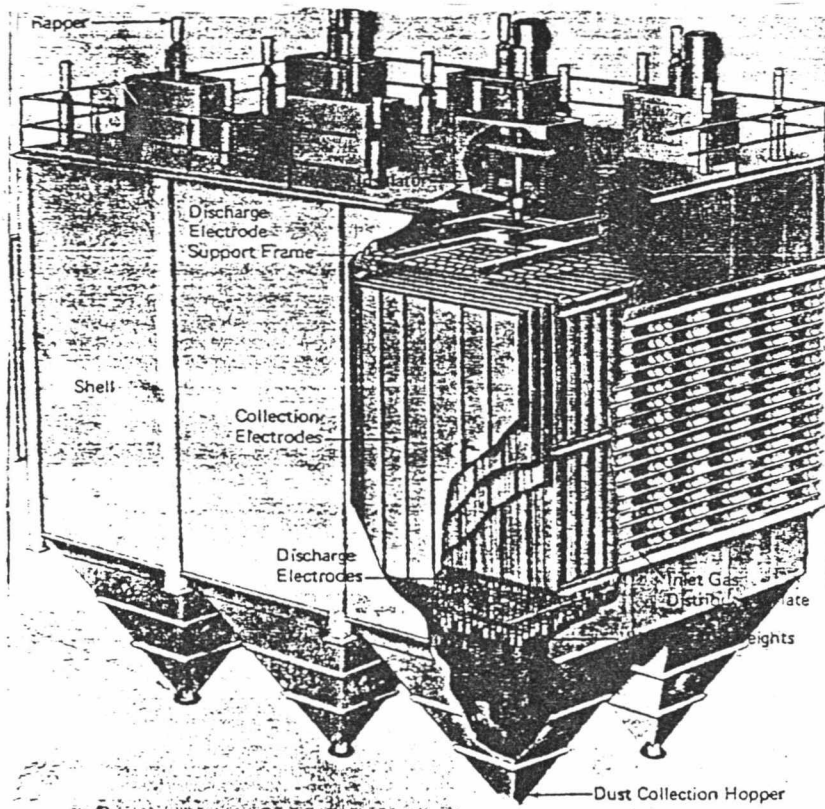
- (ก) การไอออไนเซชันจะเกิดเพิ่มขึ้นระหว่างขั้วปล่อยประจุกับขั้วแหลม

(ข) เกิดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นระหว่างส่วนแรกและส่วนที่สอง

(ค) ตัวชี้วัดแหลมเองก็จะทำตัวเหมือนเป็นตัวรับประจุที่เพิ่มขึ้นด้วย

เครื่องดักจับแบบใดๆ ถูกออกแบบให้สามารถจับ เขม่าคาร์บอน (Carbon Soot) จากเครื่องยนต์ดีเซลได้ ถ่าน (Carbon) จะจับยากมาก เนื่องจากอนุของมันมีขนาดเล็กมาก และมีความนำทางไฟฟ้าสูง เครื่องจับเขม่า จะมีอยู่ 3 ตอนด้วยกัน ส่วนให้ประจุซึ่งจะให้ประจุแก่อนุภาค ส่วนรวมตัวให้เป็นก้อน (Precoagulator) เป็นส่วนที่ทำให้เขม่าเกาะตัวกันให้มีขนาดประมาณ 1 ไมโครเมตร ซึ่งจะทำให้สามารถจับเขม่าโดยเครื่องได้ ส่วนรวมตัวให้เป็นก้อนนี้ ประกอบไปด้วย แผ่นโลหะคู่ขนานที่วางอยู่ใกล้กันมาก ซึ่งจะทำให้ฝุ่นเข้าไปติดในตอนแรก และหลุดออกมา รวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น (ประสิทธิภาพของระบบจะเพิ่มจาก 75% เมื่อไม่มีส่วนรวมตัวให้เป็นก้อน เป็น 95% เมื่อมีส่วนรวมตัวให้เป็นก้อน) ตอนสุดท้ายก็จะเป็นตัวรวบรวมเหมือนกับในระบบปกติ

2.4 ลักษณะทั่วไปของเครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์



รูปที่ 2.13 เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ที่ใช้ในโรงงานขนาดใหญ่ 10

เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์. สามารถแบ่งออกได้อย่างกว้างๆ ออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนดักจับและส่วนที่เป็นอิเล็กทรอเนกส์ ส่วนที่ใช้ในการดักจับ ประกอบไปด้วย ขั้วรวบรวม (Collection Electrode) และขั้วปล่อยประจุ (Discharge Electrode), ระบบทำความสะอาดด้วยไฟฟ้า, อุปกรณ์กระจายก๊าซ, ส่วนที่เชื่อมต่อกับภายนอก และ หม้อเก็บฝุ่น (Hopper) ส่วนที่เป็นด้านอิเล็กทรอเนกส์ ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง (High Voltage Power Supply) และส่วนที่เชื่อมต่อกับส่วนดักจับ

ก่อนที่ก๊าซจะเข้าสู่ระบบ อาจจะมีหรือไม่มีส่วนปรับปรุงสภาพก่อน (Pretreatment) ก่อนที่ก๊าซที่จะเข้ายังระบบ ส่วนปรับปรุงสภาพก่อนอาจจะประกอบไปด้วย ส่วนที่ใช้กำจัดฝุ่นเชิงกล เช่น แผงตาข่ายถ่านที่ฝุ่นขนาดใหญ่ หรือสิ่งที่มีขนาดใหญ่มาก จะถูกดักออกไปเสียก่อนรวมถึงการใช้กระบวนการทางเคมี เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของก๊าซ เพื่อช่วยในการดักจับ ดังนั้นฝุ่นที่ถูกรวบรวมจึงถูกทำให้มีสภาพต้านทานของก๊าซที่เหมาะสม

เครื่องดักจับนี้จะถูกปิดผนึกในกล่อง ซึ่งอาจจะมีรูปร่างทางเรขาคณิต เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือทรงกระบอกก็ได้ โดยไม่ว่าแบบใดก็ตาม จะมีส่วนที่เป็นทางผ่านของก๊าซทั้งขาเข้าและขาออก หม้อเก็บรวบรวมฝุ่น (Hopper) ที่จะรวบรวมและกรองสารเพื่อดักจับ และที่จะขาดเสียไม่ได้ ขั้วปล่อยประจุ (Discharge Electrode) และพื้นผิวรวบรวมฝุ่น (Collection Surface) ซึ่งจะอยู่ส่วนบนสุดของระบบ (Penthouse) ซึ่งจะต้องมีฉนวนป้องกันแรงดันไฟฟ้าสูงๆ (High - Voltage Insulator) ป้องกันอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.13

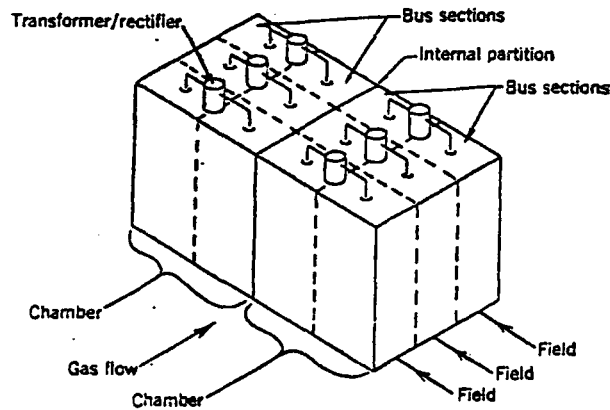
นอกจากนี้ยังประกอบด้วยเครื่องช่วยอื่นๆ เช่น ประตูทางเข้า, อุปกรณ์บังคับ (Damper) เครื่องป้องกันต่างๆ เพื่อความปลอดภัย, ระบบการกระจายก๊าซ สำหรับประตูทางเข้านี้ขณะทำงานจะถูกปิด ซึ่งจะถูกเปิด เมื่อต้องการตรวจและบำรุงรักษา ส่วนอุปกรณ์บังคับนี้จะใช้ในการควบคุมปริมาณของก๊าซ โดยจะมีลักษณะคล้ายบานเกล็ด ซึ่งจะเปิดและปิดเพื่อปรับการไหลของก๊าซ ระบบการป้องกันโดยการต่อสายดิน เป็นสิ่งสำคัญและต้องมียู่เสมอในระหว่างการใช้งาน และการตรวจสอบอุปกรณ์ ระบบสายดินนี้ประกอบด้วยตัวนำซึ่งปลายข้างหนึ่งจะต่อกับกล่อง ส่วนอีกข้างจะต่อกับระบบแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง การป้องกันแบบอื่นประกอบด้วย การจัดการปรับปรุงก๊าซโดยใช้ก๊าซเฉื่อยในการขับไล่ก๊าซที่มีคุณสมบัติติดไฟได้ เพื่อลดอันตรายจากการระเบิด อันอาจเกิดขึ้น

ระบบการกระจายก๊าซ ประกอบด้วย ใบพัดหมุนซึ่งจะทำให้อากาศไหลด้วยความเร็วสูงสุด เพื่อให้มีฝุ่นที่ตกค้างน้อยที่สุด, ลดการกัดเซาะ และปรับปรุง (จัดเตรียม) คุณสมบัติของก๊าซ และการกระจายฝุ่น

ระบบการรวบรวม ประกอบด้วย พื้นผิวรวบรวม (Collecting Surface) ที่ฝุ่นจะไปติดอยู่เพื่อรอการทำให้ดักจับ, อุปกรณ์สำหรับเคาะหรือสั่น (Rapping or Shocking) พื้นผิวรวบรวม ซึ่งมีอนุภาคที่ดักจับเกาะอยู่ ให้หลุดออกไป

ระบบแรงดันไฟฟ้าสูง (High Voltage) ประกอบด้วยขั้วปล่อยประจุ (Discharge Electrode), อาจจะมีระบบแคะขั้วปล่อยประจุ เช่น ที่มีในส่วนรวบรวมประจุด้วยก็ได้ โดยมีฉนวนเป็นตัวป้องกันเพื่อความปลอดภัย โดยการสั้นก็เพื่อทำให้พื้นที่ถูกสะสมไว้ที่ขั้วปล่อยประจุ

ระบบที่มีขนาดใหญ่มากอาจจะถูกแบ่งเป็นส่วนๆ เรียกว่า Bus Section ซึ่งเป็นส่วนที่เล็กที่สุดของเครื่องดักจับ ที่สามารถที่จะมีแหล่งจ่ายพลังงานที่เป็นอิสระต่อกันได้ โดยอาจจะมี BUS Section อยู่หลายๆ ส่วนในเครื่องดักจับ 1 กล้อง ในทางกลับกัน เครื่องดักจับที่มีขนาดใหญ่พอ อาจจะประกอบด้วย กล้องหลายๆ กล้องก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เครื่องดักจับฝุ่น 1 เครื่อง ที่ประกอบด้วย 2 Chambers, 12 Bus Sections, 6 แหล่งจ่ายไฟ และมีสนามไฟฟ้า 3 ค่า

การทำงานของเครื่องดักจับจะเพิ่มขึ้น เมื่อให้ Bus Section หลายๆ ส่วน หรือ การใช้แรงดันไฟฟ้าสูงหลายๆ ค่าในแต่ละ BUS Section ซึ่งเรียกว่า การแบ่งเป็นส่วนๆ หรือ Sectionalization ซึ่งวิธีนี้จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องดักจับ เพิ่มมากขึ้น

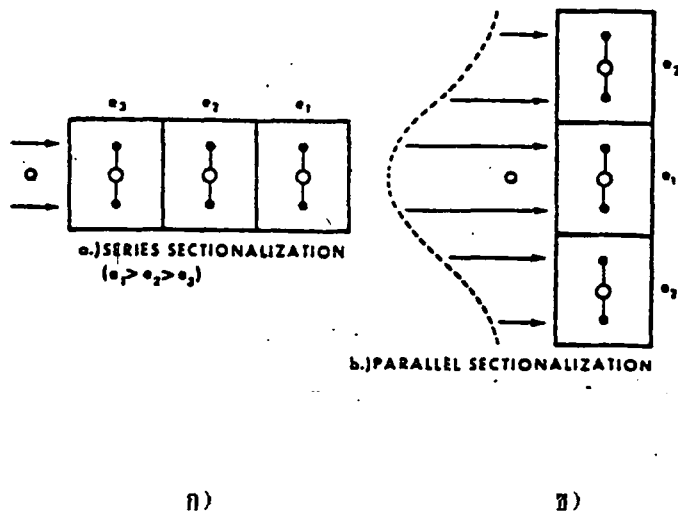
เครื่องดักจับฝุ่นสามารถแบ่งออกเป็นส่วนๆ (Sectionalization) ได้ทั้งแบบขนานและแบบอนุกรม ดังรูปที่ 2.15

การต่อแบบอนุกรมเป็นแบบที่สำคัญมาก แต่จะต้องมีแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อที่จะให้การดักจับเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ (Uniform) ถ้าใช้แรงดันที่มีค่าเท่ากัน การดักจับที่จะเกิดขึ้นก็จะไปกระจุกตัวรวมกันอยู่ในบริเวณทางเข้า ซึ่งจะทำให้เกิดผลเสีย คือ จะทำให้ศักดาที่ส่วนแรกสุดมีค่าลดลง และทำให้ความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้น ซึ่งผลทั้งสองจะทำให้ประสิทธิภาพในการจับ

ฝุ่นมีค่าลดลง เพื่อที่จะลดค่าที่ไม่ต้องการเหล่านี้ จึงต้องทำการวางส่วนที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดไว้ ส่วนหน้าสุด และส่วนถัดไปก็ค่อยๆ มีค่าลดลงไปเรื่อยๆ โดยอัตราการไหลนั้นจะต้องมีพื้นที่หน้าตัด การไหลแบบสม่ำเสมอ ส่วนความเร็วของอนุภาคในแต่ละส่วนจะไม่เท่ากันโดยจะค่อยๆ ลดลง

แบบขนานจะใช้เมื่อมีการไหลของก๊าซไม่สม่ำเสมอ โดยส่วนที่อยู่กลางจะมีอัตราการไหลมากที่สุด ซึ่งเหมาะกับสถานที่ที่มีขนาดใหญ่มาก ทำให้การไหลของก๊าซไม่สม่ำเสมอ

เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ ต้องการแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าตรง ที่มีแรงดันสูงมาก ในการทำงาน ดังนั้นหมายความว่า จะต้องใช้หม้อแปลงทำการแปลงระดับแรงดันจากค่าต่ำๆ ไป



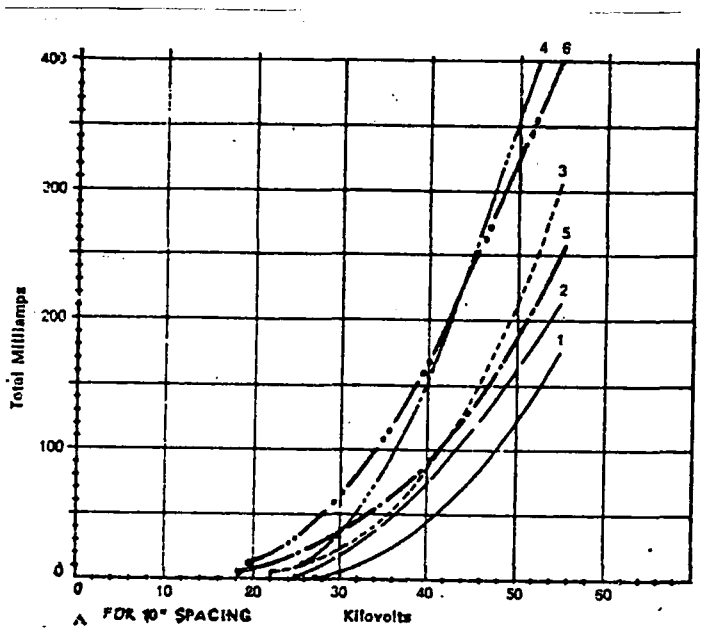
รูปที่ 2.15 การจัดเรียงตัวของเครื่องดักจับ ก) แบบอนุกรม ข) แบบขนาน

เป็นค่าสูงมาก (Kilovolt) จากนั้นก็ใช้ตัวเรียงกระแส (Rectifier) แปลงกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็นกระแสไฟฟ้าตรง ซึ่งตัวเรียงกระแสมีด้วยกันหลายประเภท เช่น แบบกลศาสตร์ (ใช้การหมุนในการผลิตไฟตรง), แบบหลอดอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Tube) ที่เป็นสุญญากาศ และใช้ของเหลวในการหล่อเย็น แบบ Selenium จุ่มในน้ำมัน หรือ Silicon จุ่มในน้ำมัน

ในเครื่องที่มีขนาดเล็กนั้น ปัจจุบันใช้วงจรทวีแรงดัน (Voltage Multiplier) โดยค่ากระแสที่ได้จะมีขนาดน้อยมาก เนื่องจากตัวเครื่องมีขนาดเล็กจึงไม่มีผลมากนัก เช่น ที่กรองอากาศ ในรถยนต์หรือที่ติดมาพร้อมกับเครื่องปรับอากาศ หรือใช้แหล่งจ่ายไฟแบบ Switching Power supply ซึ่งมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าแหล่งจ่ายไฟแบบเชิงเส้น (Linear) แบบธรรมดา

ค่าแรงดันระหว่างขั้ว มีค่าได้ตั้งแต่ 1 กิโลโวลต์ ไปจนถึง 100 กิโลโวลต์ ขึ้นอยู่กับขนาด

ของเครื่องว่าเล็กหรือใหญ่ เช่น ในเครื่องปรับอากาศ หรือที่ใช้ในรถยนต์ ก็ใช้ค่าน้อยๆ เพราะมีพื้นที่ในการทำงานน้อย แต่ถ้าเป็นโรงงานขนาดใหญ่ เช่น ในโรงงานเคมี, โรงงานเยื่อกระดาษ หรือโรงงานถลุงเหล็ก อาจจะต้องใช้ค่าแรงดันสูงมากๆ เพราะมีพื้นที่ในการทำงานขนาดใหญ่ เนื่องจากต้องใช้แรงดันสูงมาก ทำให้เกิดอุบัติเหตุหรืออันตรายได้ง่าย วิธีการอีกอันหนึ่งที่นิยมทำกันเนื่องจากให้ผลค่อนข้างจะใกล้เคียงกัน คือ แบ่งตัวเครื่องออกเป็นหลายๆ ส่วน และแต่ละส่วนก็มีค่าแรงดันต่างๆ ได้ โดยที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ ระบบ 2 ตอน ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดในหัวข้อสุดท้าย ส่วนค่ากระแสที่ไหลผ่านนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณฝุ่น ยิ่งมีฝุ่นมาก ก็จะทำให้เกิดการคราบขังมาก คือ มีค่ากระแสไหลผ่านระหว่างขั้วมาก แต่ที่เป็นเกณฑ์มาตรฐานนั้น ค่ากระแสจะอยู่ต่ำสุดที่ 0.1 มิลลิแอมป์ เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วมีค่า 12 ฟุต โดยประมาณ ซึ่งค่ากระแส



- 1) ค่าในตอนแรก และมีขั้วปล่อยประจุเป็นเส้นลาดตรง ⁵
- 2) ค่าในตอนที่สอง และมีขั้วปล่อยประจุเป็นเส้นลาดตรง
- 3) ค่าในตอนแรก และมีขั้วปล่อยประจุเป็นเส้นลาดทนาม
- 4) ค่าในตอนที่สอง และมีขั้วปล่อยประจุเป็นเส้นลาดทนาม
- 5) ค่าในตอนแรก และมีขั้วปล่อยประจุเป็นเส้นลาดรูปทรงไม่แน่นอน
- 6) ค่าในตอนที่สอง และมีขั้วปล่อยประจุเป็นเส้นลาดรูปทรงไม่แน่นอน

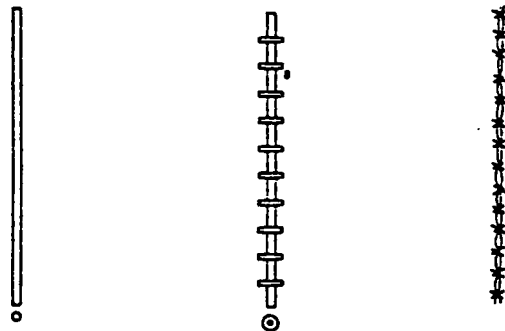
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ในเครื่องชนิด 2 ตอน

อาจจะมีค่าสูงกว่านี้หลายเท่าก็ได้ ขึ้นอยู่กับปริมาณฝุ่นว่ามีมากน้อยเพียงใด

รูปที่ 2.16 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแรงดันและค่ากระแส ในเครื่องตกตะกอนฝุ่นระบบ 2 ตอนที่ขั้วปล่อยประจุชนิดต่างๆ

กระแสที่ผ่านขดลวดปฐมภูมิ (Primary Current) คือ กระแสที่ป้อนให้แก่หม้อแปลง ส่วน กระแสของเครื่องตกตะกอนนี้ คือ กระแสที่เอาที่พูดของตัวเรียงกระแสที่เป็นกระแสดรงเฉลี่ยแล้ว ส่วนค่าแรงดันก็วัดที่ตำแหน่งเดียวกัน ค่าพลังงานที่ได้จากแหล่งจ่ายไฟจะถูกส่งไปยัง Bus Section ผ่านทางสายที่มีฉนวนหุ้มอยู่อย่างหนาแน่น โดยอาจจะเป็นสายไฟธรรมดา (Dry Cable) หรือ เคเบิลที่ถูกเติมน้ำมันจนเต็ม (Oil Filled) ในระหว่างทางเดินของแรงดันสูงนั้นไม่ควร จะให้เกิดการคายประจุทางไฟฟ้าเสียก่อน จนกว่ากระแสไฟฟ้าจะมาถึงขั้วปล่อยประจุ (Discharge Electrode) ซึ่ง ณ ที่จุดนี้จะเกิดการแตกตัว (Breakdown) ของก๊าซรอบๆ ขั้วปล่อยประจุ มีรูปแบบเป็นวงกลม (Corona Discharge) ซึ่งจะเห็นเป็นการเรืองแสงสีน้ำเงิน (ดังได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.2) ในบางครั้งก็จะเกิดการสปาร์ค (Spark) ขึ้น ซึ่งก็คือการที่ประจุเดินทางจากขั้วคายประจุไปถึงขั้วรับ (Collector) ซึ่งถ้าเหตุการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นในปริมาณที่ มากจะเรียกว่า การอาร์ค (Arc) ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ควรที่จะเกิดขึ้นมากนัก และควรจะพยายามกำจัด ออกให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ก็ไม่สามารถกำจัดให้หมดไปได้เลยทีเดียว อัตราการเกิด สปาร์ค 100 ครั้งต่อนาที 1 Section ของเครื่องที่มีขนาดใหญ่ จะเหมาะสมที่สุด

ขั้วปล่อยประจุปกติจะให้แรงดันขั้วลบ และจะต้องอยู่ที่ศูนย์กลางระหว่างขั้วรับ โดยทั่วไปจะมี รูปร่างเป็นเส้นลวดธรรมดา แต่ก็มีการใช้ลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยม หรือลวดสองเส้นไขว้กันไปมาด้วย

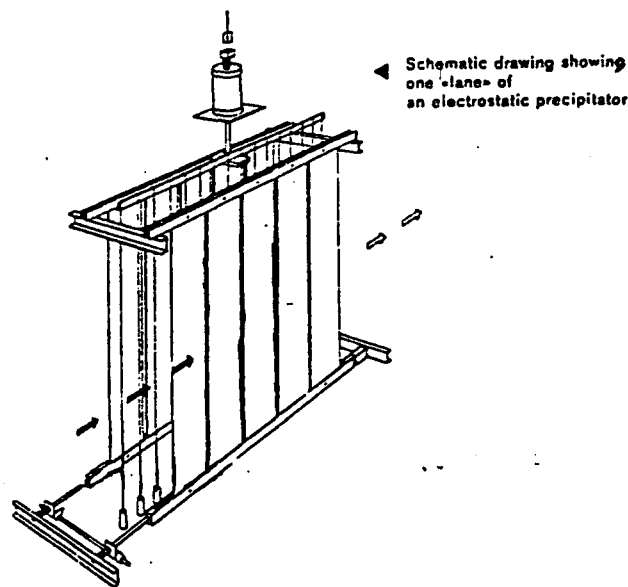


เส้นลวดปกติ เส้นลวดมีวงแหวนคั่น ลวดหนาม

รูปที่ 2.17 ลักษณะของขั้วปล่อยประจุแบบต่างๆ

เส้นลวดเหล่านี้ ซึ่งปกติจะแขวนโดยอิสระ โดยการถ่วงด้วยวัตถุที่มีน้ำหนักที่ปลายด้านหนึ่ง หรือ อาจจะทำให้ติดกับอีกด้านหนึ่งไปเลยก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ข) และอาจมีรูปแบบพิเศษอื่น เช่น ลวดหนาม หรือ มีแผ่นโลหะเป็นวงกลมขึ้นอยู่เป็นระยะๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งผล การทำเช่นนี้ จะทำให้ได้ค่าสนามบริเวณที่มีวัสดุนี้ๆ อยู่ (Local Field) มีค่าแรงขึ้น อันเป็น ผลทำให้ประจุที่ออกมาจากขั้วปล่อยประจุ เป็นประจุชนิดเดียวกัน ส่วนวัสดุที่ใช้ทำนั้น เป็นโลหะ หลายชนิด เช่น ทังสแตน, อัลลอยท์, ทองแดง โดยคุณสมบัติที่ต้องพิจารณาเป็นสำคัญ คือ ความ ทนทานต่อการกัดกร่อนจากทั้ง ลมและสารเคมี รวมทั้งจะต้องมีสภาพการป้องกันการเป็นสนิมสนิม ด้วย

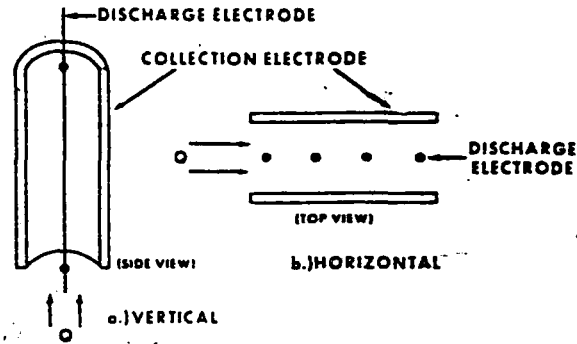
ส่วนขั้วรับนั้นอาจมีรูปแบบเป็น ท่อกลมหรือแผ่น ก็ได้ แต่ต้องเว้นระยะห่างจากขั้วปล่อยประจุ เป็นระยะห่างเท่าๆ กัน ขั้วรับประจุที่ดีจะต้องมีพื้นที่เป็นจำนวนมาก เพื่อที่จะทำให้สามารถรับ ประจุให้ได้มากที่สุด หรือ มีความต้านทานการเป็นสนิม ที่สำคัญที่สุดคือ ต้องสามารถทนต่อการสั่น



รูปที่ 2.18 แสดงภาพตัวอย่างเมื่อนำขั้วปล่อยและรับประจุมารวมกัน

หรือเคาะได้ เนื่องจากจะต้องมีการสั่นหรือเคาะ เพื่อที่จะทำให้ฝุ่นที่เกาะติดอยู่หลุดออกมาได้ จากรูป 2.18 เป็นภาพ เมื่อนำขั้วรับประจุและปล่อยประจุมารวมเข้าด้วยกัน ซึ่งขั้วรับประจุ เป็นแผ่นคู่ขนาน มีขั้วปล่อยประจุอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างขั้วรับประจุ

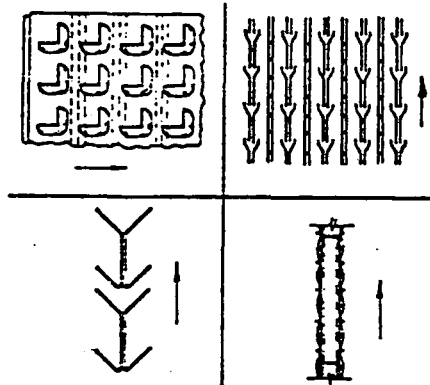
ขั้วรับประจุอาจแบ่งออกเป็นประเภท ตามทิศทางการไหลของก๊าซได้ 2 แบบ คือ แบบตามแนวตั้ง (Vertical) และแนวนอน (Horizontal) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และรูปที่ 2.20 แสดงการจัดเรียงตัวของขั้วรับประจุแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการรับให้ได้มากที่สุด



ก) แบบแนวตั้ง

ข) แบบแนวนอน

รูปที่ 2.19 ชนิดของขั้วรับประจุ



รูปที่ 2.20 การจัดเรียงตัวของขั้วรับประจุแบบต่างๆ

ส่วนหม้อเก็บฝุ่นนั้น จะรวมอยู่ในระบบเดียวกัน และทำมาจากวัสดุเดียวกัน

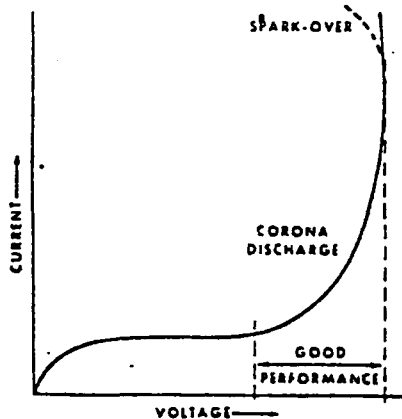
2.4.1 หลักของเครื่องดับด้วยไฟฟ้าสถิตย์

มีกลไกต่างๆ มากมายที่ทำให้อนุภาคมีประจุไฟฟ้า อนุภาคโดยปกติจะมีประจุไฟฟ้าได้ เมื่อมันได้รับพลังงานสูง ซึ่งอาจจะได้มาจาก การไปติดหรือถูกกับแหล่งที่มีพลังงานสูง เช่น แสง เบลวไฟ หรือแม้แต่วิ่งสี่คอส้มที่อยู่ในบรรยากาศของโลก และการเกิดประจุอาจทำได้จากการมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงมากๆ ก็ได้

ในธรรมชาติ อนุภาคจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า อนุภาคที่มีประจุตามธรรมชาติจะมีค่าไม่เพียงพอที่จะใช้ในเครื่องดับด้วยไฟฟ้าสถิตย์ได้ โดยในเครื่องดับจะใช้แรงดันไฟฟ้าค่าสูงมาก อยู่ในช่วง 10-100 กิโลโวลต์ (แต่ปกติใช้ 40-60 กิโลโวลต์) ซึ่งจะถูกใส่ให้กับขั้วปล่อยประจุ และขั้วรับประจุ เพื่อให้ก๊าซเกิดการไอออไนซ์ โดยในบริเวณนี้จะมีไอออนบวกและลบเกิดขึ้นอย่างมากมาย (การไอออไนซ์ของก๊าซ เป็นการแยกจากกันของโมเลกุลก๊าซเป็นไอออนอิสระ) แรงดันสูงที่ทำให้ระหว่างขั้วทั้งสอง จะทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซ ที่ไม่นำไฟฟ้าให้เป็นไอออน ที่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ โดยการเคลื่อนที่ของไอออน เวลาที่ใช้ในการประจุปกติจะมีค่าประมาณ 0.01 วินาที หรือน้อยกว่านี้ ปกติจะมีไอออนลบประมาณ 10^{18} ตัวต่อลูกบาศก์เซนติเมตรเมื่อใช้การคายประจุเป็นทรงกลม (Corona Discharge)

ก๊าซที่ผ่านระหว่างขั้วทั้งสอง อนุภาคจะถูกชนด้วยไอออน ที่วิ่งจากขั้วปล่อยประจุไปยังขั้วรับประจุ ซึ่งอนุภาคจะได้รับประจุทั้งสองขั้วจากขั้วปล่อยประจุ ทำให้อนุภาคที่วิ่งไปยังขั้วรับประจุ มีขั้วทั้งบวกและลบ

การพัง (Breakdown) ทางไฟฟ้าบางส่วนของก๊าซที่อยู่รอบๆ ขั้วปล่อยประจุ จะปรากฏเป็นการเรืองแสงสีน้ำเงินเรียกว่า การทรงกลม (Corona or Corona Glow) การเพิ่มค่าแรงดันที่มากกว่าแรงดันที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ (Corona Voltage) จะเป็นผลให้กระแสที่ไม่จำกัด



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดันและกระแส ระหว่างขั้วรับและขั้วปล่อยประจุ

ถูกส่งผ่านระหว่างขั้วทั้งสอง และจะอยู่ในรูปของการเกิดสปาร์คเกินขีดจำกัด (Sparkover) ดังแสดงใน รูปที่ 2.21

ในการทดลองพบว่า การเกิดสปาร์คเกินขีดจำกัด ในบางระบบอาจมีค่าสูงถึง 100 ครั้งต่อ ต่อนาที และ 1 ครั้งต่อนาทีในบางระบบ สปาร์คอาจจะเปลี่ยนเป็นอาร์ค (Arc) ได้ โดยสังเกตได้ว่า จะเกิดการลุกไหม้ที่ขั้วทั้งสองอย่างรวดเร็ว

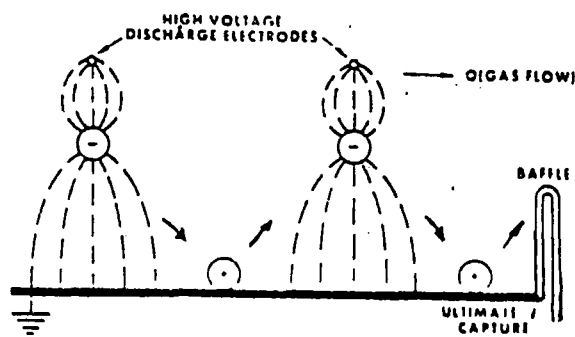
ผลจากการที่อนุภาคได้รับการประจุ คือ แรงแยกตัว ซึ่งเป็นสัดส่วนของค่าประจุคูณด้วยค่าของความหนาแน่นของสนามไฟฟ้า ตัวอย่างขนาดของแรง เช่น 3000 เท่าของแรงโน้มถ่วงของโลก สำหรับอนุภาคที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ไมครอน และ 300 เท่าของแรงโน้มถ่วงโลก สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ไมครอน ถ้าอนุภาคมีความหนาแน่นเท่ากับหนึ่ง จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นว่า เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์นี้ใช้ได้ผลดีและมีประสิทธิภาพสูง

อนุภาคที่ถูกประจุโดยไอออนนั้น จะพยายามเคลื่อนที่เข้าหาขั้วรับ อัตราการเคลื่อนที่จะขึ้นกับค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้ว (หรือแรงดันไฟฟ้าค่าสูงๆ ที่ให้เข้าไป) หรือในทางกลับกันอัตราการเคลื่อนที่นี้จะขึ้นกับค่าสภาพต้านทานของฝุ่นด้วย โดยสภาพต้านทานนี้จะอยู่ในรูปของความต้านทานของตัวกลางต่อการไหลของกระแสไอเลคตรอน

สภาพต้านทานของฝุ่น ที่ใช้ในเครื่องดักจับ สามารถแบ่งได้อย่างหยาบๆ 3 กลุ่ม

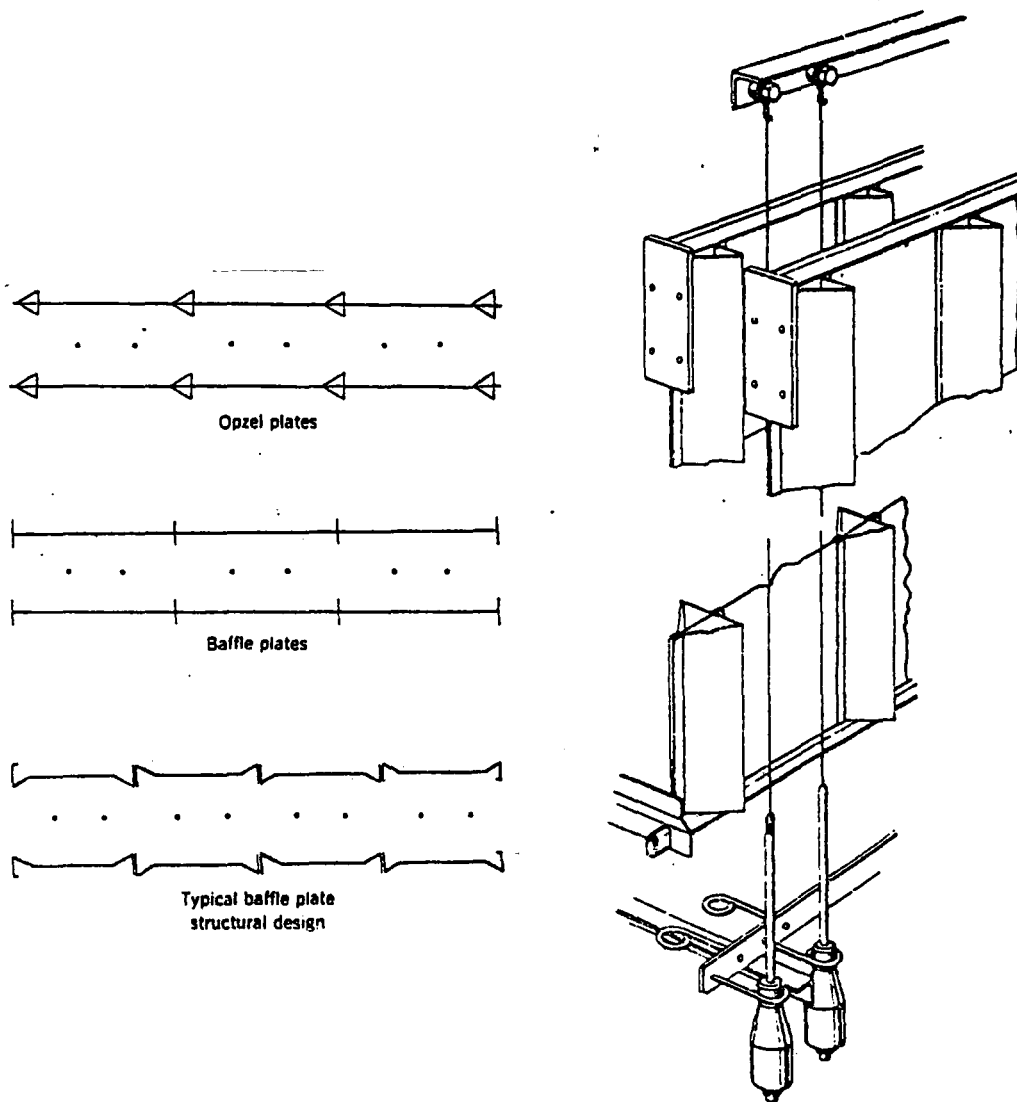
1. ฝุ่นที่มีค่าสภาพต้านทานต่ำกว่า 5×10^3 โอห์ม-เซนติเมตร
2. ฝุ่นที่มีค่าสภาพต้านทานอยู่ระหว่าง 5×10^3 และ 2×10^{10} โอห์ม-เซนติเมตร
3. ฝุ่นที่มีค่าสภาพต้านทานมากกว่า 2×10^{10} โอห์ม-เซนติเมตร

อนุภาคในกลุ่ม 1 จะรวบรวมได้ยาก เนื่องจากอนุภาคเหล่านี้ ถูกประจุและดักจับได้ง่าย แต่เมื่อไปถึงขั้วรับแล้ว มันก็จะสูญเสียสภาพความมีขั้วของมัน และจะมีขั้วเป็นขั้วเดียวกับขั้วรับแทน



รูปที่ 2.22 วิธีการจับอนุภาคที่มีค่าสภาพต้านทานต่ำ

เมื่อมีตัวเคี้ยวตัวกันนอนภาคก็จะถูกผลักกลับไปในทางเดินของก๊าซอีกครั้งหนึ่ง จะเกิดการหนีการดักจับเมื่อเข้าไปอยู่ใน ทางเดินของก๊าซก็จะถูกประจุ โดยสนามไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะสามารถแก้ไขเหตุการณ์นี้ได้โดยการสร้างตัวกัน (Buffer) ที่ผิวตัวรับประจุ (Collection Wall) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 จะเห็นว่า ที่ผิวของตัวรับประจุจะถูกทำให้มีลักษณะเป็นรอยหยักหรือมีเหล็กหรือวัสดุอื่นเล็กๆ คั่นอยู่ เมื่อฝุ่นจะหลุดไปยังทางเดินของก๊าซอีกครั้งหนึ่ง ก็จะไปติดตรงบริเวณนี้ ทำให้ไม่สามารถกลับเข้าไปในทางเดินอากาศได้อีก



ก)

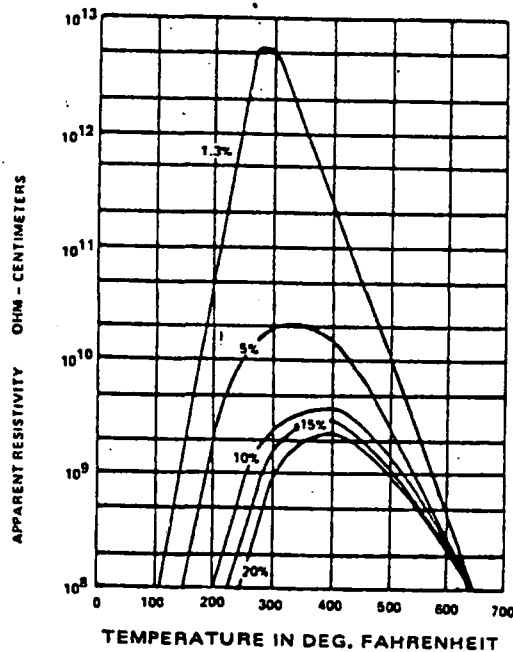
ข)

รูปที่ 2.23 ก) Buffer ที่ตัวรับประจุ

ข) Buffer ที่ใช้ในตัวรับประจุจริงๆ

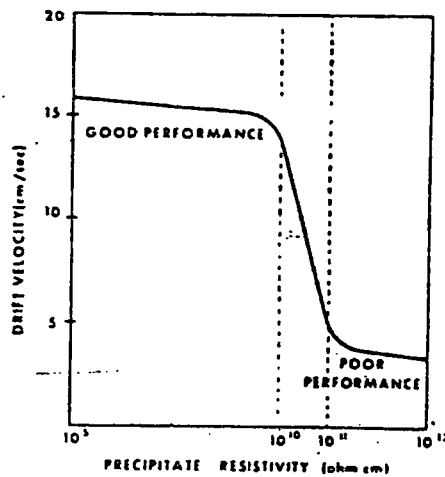
อนุภาคที่มีพิภพความต้านทานในกลุ่ม 3 จะทำให้เกิดจากการไอออไนเซชันย้อนกลับ (Back Ionization) ซึ่งก็คือ การคายประจุที่จำกัดอยู่ในบริเวณหัวรับประจุ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อผิวหัวรับประจุถูกเคลือบด้วยชั้นของสารที่ไม่นำไฟฟ้า (ซึ่งก็คือฝุ่นนั่นเอง) การเกิดการไอออไนเซชันย้อนกลับอย่างอ่อนจะทำให้ค่าศักย์ที่ทำให้เกิดการสปาร์คเกินขีดจำกัด (Sparkover) ลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าเกิดการไอออไนเซชันย้อนกลับมากๆ (Strong Back Ionization) จะสร้างการคายประจุไอออนบวกที่หัว โดยปรากฏการณ์การเกิดการไอออไนเซชันย้อนกลับจะส่งผลรุนแรงมากยิ่งขึ้น เมื่อชั้นฉนวนหรือฝุ่น ที่เกาะหรือเคลือบอยู่บนหัวรับ มีสภาพต้านทานของชั้นมากกว่า 10^{11} โอห์มเซนติเมตร

จากการทดลองพบว่า อนุภาคที่มีสภาพต้านทานในกลุ่ม 2 เป็นอนุภาคที่เหมาะสมที่จะถูกเครื่องดักจับด้วยไฟฟ้าสถิตย์จับได้มากที่สุด อนุภาคจะไม่สูญเสียประจุ เมื่อสัมผัสกับหัวรับเร็วเกินไป หรือทำให้เกิดการไอออไนเซชันย้อนกลับ การทำให้การไอออไนเซชันย้อนกลับจะลดลงได้เมื่อทำให้คุณสมบัติของก๊าซที่ไหลผ่านระบบเปลี่ยนแปลงไป เช่น เปลี่ยนอุณหภูมิ, เปลี่ยนสารที่ให้ความชื้น หรือการผสมสารเคมี เพื่อให้คุณสมบัติของก๊าซที่ผ่านระบบเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.24 ผลของอุณหภูมิและความชื้นกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฝุ่นซีเมนต์

ค่าสภาพต้านทานจะลดลงในช่วงอุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำกว่าค่าค่าหนึ่ง ความชื้นของก๊าซจะมีผลต่อการจับอนุภาคเช่นกัน เพราะจะทำให้สภาพต้านทานของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไป อนุภาคที่เป็นของแข็งจะดูดกลืนความชื้นในช่วงที่อุณหภูมิต่ำ และในกรณีสภาพอื่นๆ ความชื้นมีค่า 20% หรือน้อยกว่า ซึ่งจากสภาพดังกล่าวจะทำให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต คือ 2×10^{11} โอห์ม เซนติเมตร ตัวอย่างเช่น การใช้ระบบเพิ่มความชื้นของก๊าซที่ทางเข้า จะทำให้ค่าสภาพต้านทานของฝุ่นลดลงอย่างมาก เมื่อฝุ่นนั้นเป็นซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.24 และรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ผลของค่าสภาพต้านทานต่อประสิทธิภาพในการจับฝุ่นซีเมนต์

กระแสการไหลของก๊าซก็เป็นปัจจัยที่สำคัญมากอีกตัวหนึ่ง ในการรวบรวมอนุภาค เช่น ความเร็วของก๊าซที่มากเกินไป สามารถทำให้เกิดการไหลวนของก๊าซ ทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของฝุ่นไม่แน่นอน พื้นที่ๆ ที่เกิดเหตุการณ์เช่นนี้ได้แก่

1. ผนัง
2. ทางเข้าเครื่องตกตะกอน
3. ช่องหรือจุดเชื่อมต่อที่เกิดการรั่วไหลของก๊าซ

สภาพทางเคมีของก๊าซ ก็มีผลอย่างมากต่อการลดลงของสภาพต้านทานทางไฟฟ้า ซึ่งก็จะทำให้ประสิทธิภาพของการรวบรวมดีขึ้น ตัวอย่างของก๊าซ การปรับสภาพก๊าซด้วยความชื้น และ SO_2 หรือการใช้คลอรีน ในการทำให้สภาพของก๊าซที่เป็นฝุ่นของหินปูนเปลี่ยนแปลงไป การกัดกร่อนของก๊าซเหล่านี้เป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมากเช่นกัน

ขนาดของเครื่องดักจับ มีตั้งแต่ขนาดเล็กที่ใช้ภายในรถยนต์ไปจนถึงขนาดใหญ่มากที่ใช้ในการจับที่เป็นซีดีซึ่งเกิดจากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ในทางอุตสาหกรรมโดยอาจมีอัตราการไหลของก๊าซมากกว่า 2,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ความจริงขนาดของเครื่องดักจับนี้จะกำหนดด้วยพื้นที่ตัวรับประจุที่ต้องการ

ขนาดของตัวรับประจุ หาได้จากการไหลของก๊าซ, ประสิทธิภาพที่ต้องการ และความเร็วของอนุภาค ความสัมพันธ์ระหว่าง พื้นที่ในการรับประจุกับประสิทธิภาพในการจับ (นั่นคือ พื้นที่ของแผ่นรับประจุ/อัตราการไหลของก๊าซ = A/Q) ได้มาจากสมการของดอยท์ ซึ่งกล่าวมาแล้วข้างต้น โดยแปลงรูปเป็น

$$E = 1 - 1/\text{EXPC}[(A/Q)V_p]$$

โดย E คือ ประสิทธิภาพ, A คือ พื้นที่ Collection Plate, Q คือ การไหลของก๊าซ, V_p คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่วิ่งไปยัง ตัวรับประจุ

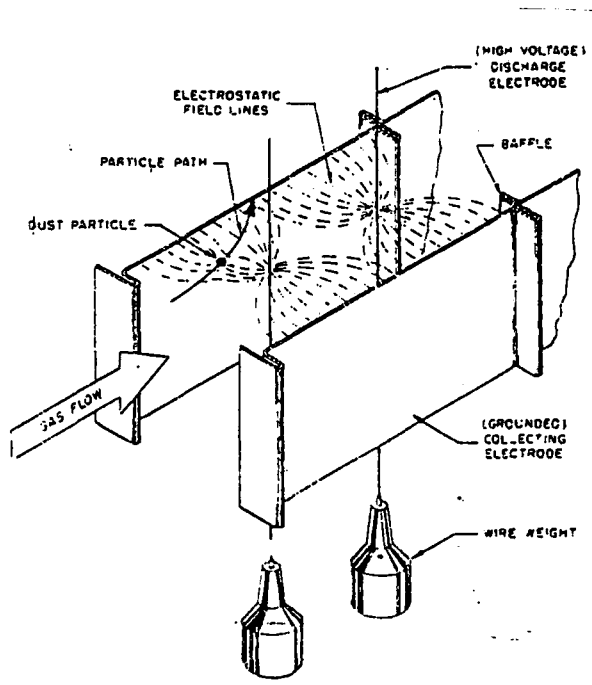
ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคหนึ่งตัว จะแปรผันโดยตรงกับขนาดของอนุภาค (นั่นคือ รัศมี) ความเร็วเฉลี่ยนี้มีค่าตั้งแต่ 3 เซนติเมตรต่อวินาที เมื่ออนุภาคมีขนาด 0.5 ไมครอนในก๊าซที่ร้อนและชื้นสูงถึง 45 เซนติเมตรต่อวินาที สำหรับอนุภาคขนาด 50 ไมครอนในอากาศทั่วไป โดยปกติเครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ จะใช้ได้ดีกับฝุ่น ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย เล็กกว่า 20 ไมครอน เนื่องจากว่าที่ฝุ่นขนาดใหญ่กว่านี้ เมื่อใช้วิธีอื่น ในการจับจะเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่า แต่ตามคุณสมบัติของตัวเครื่องเองแล้ว สามารถจับได้ตั้งแต่อนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ทรายหยาบ ไปจนถึงฝุ่นที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าซึ่งต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ในการตรวจสอบ และประสิทธิภาพของเครื่องจะแปรตามขนาดของฝุ่น คือ ยิ่งฝุ่นที่มีขนาดเล็กมากๆ ก็จะต้องทำให้ประสิทธิภาพในการจับฝุ่นลดลง

นอกจากฝุ่นที่เป็นอนุภาคแล้ว เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ ก็ยังสามารถจะจับหยดน้ำหรือละอองก๊าซได้อีกด้วยโดยของเหลวนั้น จะต้องมีคุณสมบัติความมีขั้วซึ่งจะทำให้มีผลต่อแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า ซึ่งได้กล่าวถึงหลักการดังกล่าว ในหัวข้อที่แล้ว

2.4.2 ชนิดของเครื่องดักจับ

เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ มีความแตกต่างกันตาม วัตถุประสงค์ในการผลิตในเบื้องต้น สามารถแบ่งชนิด การทำงานของเครื่องได้สองแบบ คือ เครื่องดักจับแบบเปียกและ

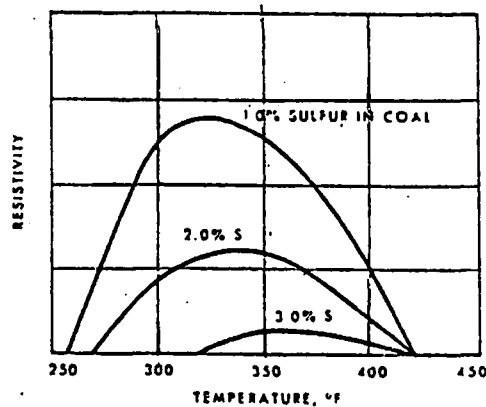
แบบแห้ง โดยปกติเครื่องดักจับแบบเปียก เป็นตัวจับที่มีประสิทธิภาพมากกว่า นอกจากนี้ยังแบ่งตามชนิดของพื้นผิวในการรับประจุได้เป็น เครื่องดักจับชนิดที่มีพื้นผิวเป็นท่อ (Pipe) คือ เป็นทรงกระบอก หรือหลายเหลี่ยม กลวง โดยมีขั้วปล่อยประจุอยู่ที่จุดศูนย์กลางของทรงกระบอก ทอดไปตามความยาว ขนาดของทรงกระบอกนั้นขึ้นอยู่กับ ปริมาณก๊าซและพื้นที่ของระบบที่มีอยู่ และอีกชนิดที่มีพื้นผิวเป็นแผ่น (Plate) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแผ่นบาง คู่ขนานกัน โดยมีขั้วปล่อยประจุที่อยู่ในตำแหน่งระหว่างแผ่นคู่ขนานพอดี เพื่อทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เป็นลักษณะสมมาตร ระยะห่างระหว่างแผ่นอยู่ในช่วง 15-30 เซนติเมตร วัสดุที่นำมาใช้ทำนั้นมีอยู่มากมาย เช่น อลูมิเนียม, ทองแดง, เหล็กไร้สนิม (Stainless Steel), Nichrome, Hastelloy เป็นต้น ซึ่งต้องพิจารณาคุณสมบัติความคงทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี และความแข็งแรงเมื่อได้รับแรงกระแทก เพราะจะต้องมีการกระแทก เพื่อให้ฝุ่นที่ติดอยู่หลุดออกมา นอกจากนี้แล้ว ทิศทางการไหลของก๊าซก็สามารถแบ่งชนิดของ เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ได้ คือ เครื่องดักจับชนิดไหลตามแกนตั้ง กับชนิดไหลตามแกนนอน ดังรูปที่ 2.19 ชนิดไหลตามแกนนอนจะเหมาะ เมื่อมีพื้นที่ในการทำระบบค่อนข้างมาก และต้องการให้การกระจายของอากาศเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ แต่จะมีปัญหา



รูปที่ 2.26 เครื่องดักจับฝุ่นชนิดแผ่นคู่ขนาน และมีขั้วปล่อยประจุอยู่บริเวณกึ่งกลาง 5

เมื่อต้องการนำฝุ่นออกจากระบบ เพราะคอนข้างจะยุ่งยาก ส่วนชนิดไหลตามแกนตั้งนั้น เหมาะกับบริเวณที่มีพื้นที่น้อย และ จะนำฝุ่นออกจากระบบได้ง่าย เพราะมีแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้ฝุ่นหลุดออกมือง่าย แต่ระบบระบายอากาศ จะทำได้คอนข้างจะยุ่งยาก เนื่องจากพื้นที่มีน้อย

เครื่องดักจับที่นิยมใช้กัน และมีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ เครื่องดักจับที่ใช้ระบบแห้ง มีพื้นผิวรับประจุเป็นแบบแผ่น และมีทิศทางไหลของก๊าซตามแนวตั้ง วิธีที่ใช้ในการลดค่าสภาพต้านทานของฝุ่น ก็ยังแบ่งชนิดของเครื่องดักจับออกได้เป็น แบบร้อนหรือเย็น ค่าสภาพต้านทานที่ต่ำจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องให้สูงขึ้นได้ ที่อุณหภูมิประมาณ 93.3 องศาเซลเซียส ก๊าซซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ถ่านกับกำมะถันที่ปริมาณต่างๆ จะมีค่าสภาพต้านทานเกือบเท่ากับหมด ไม่ว่าจะมปริมาณกำมะถันเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นคือ ที่อุณหภูมิ 148.9-176.7 องศาเซลเซียส จะมีการเพิ่มของค่าสภาพต้านทานอย่างรวดเร็วในก๊าซที่มีปริมาณกำมะถันน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.27 และที่อุณหภูมิมากกว่า 204.4 องศาเซลเซียส ค่าสภาพต้านทานจะลดลง จนกระทั่ง มีค่าเท่ากับ เมื่อตอนที่กำมะถันสูง เครื่องดักจับแบบเย็น ปกติจะทำงานที่อุณหภูมิในช่วง 148.9-176.7 องศาเซลเซียส ส่วนแบบร้อนจะทำงานในช่วง 315.6-343.3 องศาเซลเซียส จากกราฟจะเห็นว่า ในช่วงอุณหภูมิทั้งสองนี้ จะมีค่าสภาพต้านทานโดยประมาณเท่ากันไม่ว่าจะมีปริมาณกำมะถันมากน้อยเพียงใด จะสังเกตเห็นว่า แบบร้อนจะใช้เวลาในการทำงาน มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งเท่าครึ่งของแบบเย็น เมื่อมีเงื่อนไขอื่นๆ แบบเดียวกัน เนื่องจากปริมาตรของก๊าซจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงทำให้ต้องใช้เวลามากขึ้น



รูปที่ 2.27 ผลของกำมะถันต่อค่าสภาพต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆ

2.4.3 วิธีการปรับปรุงสภาพของก๊าซ

เนื่องจากจำเป็นที่จะต้องควบคุมค่าสภาพต้านทานของอนุภาค ให้อยู่ในช่วงค่าๆ หนึ่งที่เหมาะสมกับเครื่องดักจับด้วยไฟฟ้าสถิตย์ จึงต้องมีวิธีการต่างๆ เพื่อที่จะควบคุมค่าสภาพต้านทานของอนุภาค ซึ่งสามารถทำได้โดย การเปลี่ยนอนุภาค, การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและการเพิ่มความชื้น

(i) การเปลี่ยนอนุภาค

สารเกือบทั้งหมดเมื่ออนุภาคเพิ่มขึ้น ค่าสภาพต้านทานก็จะเพิ่มขึ้นตาม จนกระทั่งถึงค่าสูงสุดอันหนึ่ง ซึ่งถ้ายังเพิ่มอนุภาคต่อไป ค่าสภาพต้านทานจะลดลง การใช้เครื่องดักจับเป็นแบบร็อนหรือ แบบเอ็นก็จะช่วยให้ได้ค่าสภาพต้านทานที่ต้องการได้ทั้งคู่ เครื่องแบบร็อนที่อุณหภูมิ 371.1 องศาเซลเซียส ใช้สำหรับก๊าซที่มีเปอร์เซ็นต์กำมะถันสูง ในขณะที่แบบเอ็นจะใช้อุณหภูมิ 164.9 องศาเซลเซียสและใช้เมื่อมีค่าปริมาณกำมะถันสูง สำหรับสารอื่นๆ จะเปลี่ยนไปตามคุณสมบัติของสารนั้นๆ

(ii) การเปลี่ยนสภาพทางเคมี

การใช้คลอรีนในการปรับสภาพฝุ่นที่เป็นหินปูนได้กล่าวไปแล้วครั้งหนึ่งว่า เป็นตัวอย่างของวิธีการเปลี่ยนสภาพทางเคมี ส่วนสารอื่นๆ ก็สามารถใช้วิธีทางเคมี เพื่อให้ได้ค่าสภาพต้านทานตามต้องการได้ ตัวอย่างเช่น การปรับสภาพก๊าซที่มีโซเดียมผสมอยู่ในรูปของก๊าซโซเดียมไตรออกไซด์ เมื่อรวมกับถ่านหินประมาณ 2% จะทำให้ค่าสภาพต้านทานอยู่ในช่วงที่ต้องการได้

(iii) การเปลี่ยนแปลงความชื้น

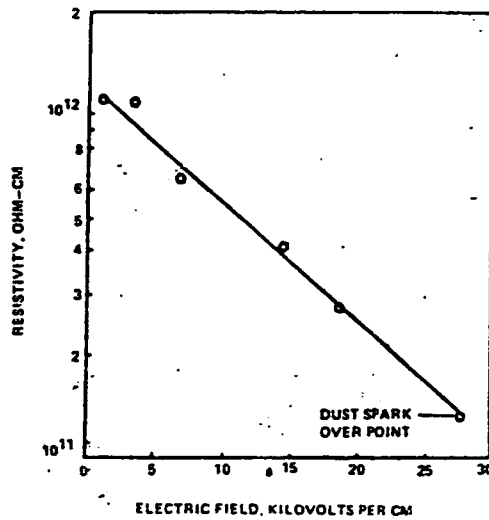
เมื่ออนุภาคตกความชื้นจะมีค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มความชื้นสามารถทำได้โดย การพ่นไอน้ำ, การใช้ละอองน้ำ หรือการทำให้สารเปียกก่อน สภาพความชื้นจะมีผลอย่างมากที่อุณหภูมิต่ำกว่า 148.9 องศาเซลเซียส และแน่นอน เมื่อความชื้นเพิ่มมากขึ้นย่อมจะทำให้อนุภาคของก๊าซลดลง จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ความชื้น 1-2 % กับก๊าซที่อุณหภูมิห้อง เมื่อความชื้น 10-20 % ใช้สำหรับก๊าซที่มีอุณหภูมิ 148.9 องศาเซลเซียส

(iv) การวัดสภาพต้านทาน

ค่าสภาพต้านทานสามารถวัดได้ในห้องทดลอง แต่ก็จะมีค่าผิดพลาดต่างๆ เกิดขึ้นมากมาย วิธีที่จะได้ค่าจริงๆ นั้น ต้องทำการวัดในระบบจริงๆ เท่านั้น ซึ่งเป็นไปได้ไม่บ่อย แต่สิ่งที่เป็นไปได้คือการทำให้หัวที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงนั้นมีค่าต่ำลง ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลๆ ผ่านชั้นของฝุ่นที่เกาะอยู่ แล้วทำการวัดค่ากระแสรั่วไหลที่ผ่านชั้นนั้นด้วย หัววัดซึ่งมีอยู่หลายชนิด

การหาค่าสภาพต้านทานในห้องทดลอง พบว่า มีค่าเปลี่ยนแปลงไปมากถึง 100 เท่าของค่าที่วัดได้จากระบบจริง ตัวอย่างแบบหนึ่งของค่าสภาพต้านทานของซีเฝ้าของถ่าน ที่มีปริมาณของค่า

ซีลเฟอร์สูง แสดงอยู่ในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ค่าสภาพต้านทานของแก้วที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับระบบ

2.4.4 การนำฝุ่นดักจับเรือบร้อยแล้วออกจากระบบ

การเคลื่อนย้ายสารที่ถูกดักจับแล้ว มีความสำคัญ เนื่องจาก อนุภาคที่ถูกรวบรวมแล้ว อาจจะถูกทำให้เคลื่อนที่ขึ้นขึ้นไปในกระแสก๊าซได้ ส่วนอนุภาคที่เป็นของเหลว เช่น ก๊าซของกรด ซัลฟูริกหรือน้ำมันดิน จะง่ายต่อการควบคุมเนื่องจากมันจะไหลจากขั้วรับ ดิ่งลงตามแรงดึงดูดของโลก โดยปกติแล้ว อนุภาคของของเหลวจะไม่ย้อนกลับเข้าไปในกระแสการไหลของก๊าซอีก นอกเสียจากความเร็วของก๊าซจะมีค่ามาก (ตั้งแต่ 900 เซนติเมตรต่อวินาทีขึ้นไป)

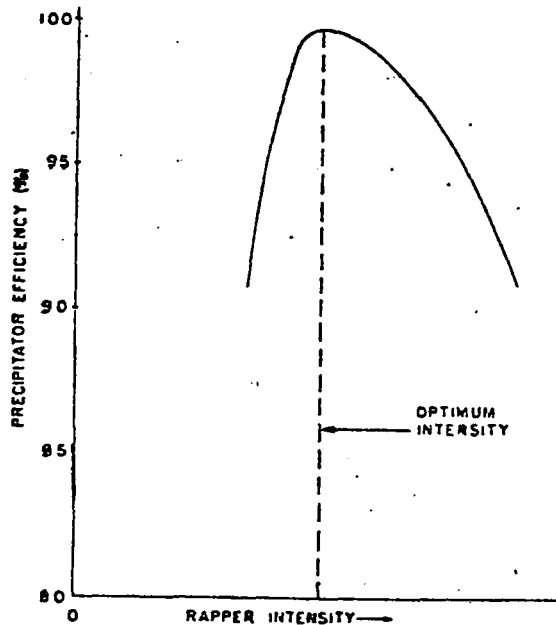
ระบบการทำความสะอาดขั้วรับ จะขึ้นอยู่กับ ชนิดของตัวเครื่องของเครื่องดักจับ ตัวเครื่องของเครื่องดักจับ อาจจะถูกออกแบบให้มีการรวบรวม และเคลื่อนย้ายอนุภาคที่รวบรวมได้ ด้วย การพ่นน้ำค่าน้อยๆ หรือ คิดในรูปความหนาคือมีขนาดบางๆ คล้ายกับแผ่นฟิล์มนั้นเคลื่อนอยู่กับแผ่นโลหะ (กรณีเครื่องดักจับแบบเปียก) ให้ไหลอยู่ตลอดเวลา ส่วนในกรณีเครื่องดักจับแบบแห้ง การทำความสะอาดพื้นผิวขั้วรับจะใช้วิธีเชิงกล เช่น การสั่น, การเคาะ หรือบางครั้งใช้การพ่นน้ำเป็นละอองเข้าไปในระบบก็ได้

ส่วนขั้วปล่อยประจุ นั้น ก็มีความจำเป็นที่จะต้องทำความสะอาดอยู่เสมอ เพราะอย่างที่ทราบ

แล้วว่าจะมีไอออนทั้งบวกและลบเกิดขึ้นจากขั้วปล่อยประจุ ทำให้อาจมีประจุที่มีขั้วตรงกันข้ามกับขั้วปล่อยประจุเกิดไปทำการประจุให้กับอนุภาค และถูกดึงกลับมาหาขั้วปล่อยประจุได้อีก ทำให้เกิดฝุ่นมาเกาะอยู่ที่ขั้วปล่อยประจุ เป็นผลให้ขั้วปล่อยประจุไม่สามารถปล่อยประจุได้เต็มที่ ผลก็คือ ค่าสนามไฟฟ้ามีค่าลดลง ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องลดลงด้วย

วิธีการเคาะ (Rapping) ที่ใช้ใน เครื่องดักจับด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบแห้งนั้น อาจจำแนกเครื่องมือที่ใช้ ออกได้เป็น 2 แบบ คือ ชนิดให้แรงกระเทือนกับขั้วรับประจุ ซึ่งเปรียบได้เหมือนกับการใช้ค้อนเคาะ และอีกแบบหนึ่งคือ ใช้การสั่นที่ต่อเนื่องกับระบบ ชนิดที่ใช้การกระเทือนเหมาะสำหรับการทำความสะอาดขั้วรับประจุ ในขณะที่ชนิดการสั่นใช้ได้ดีสำหรับทำความสะอาดขั้วปล่อยประจุ

ระบบสั่นหรือระบบการกระเทือนนั้น จะทำให้สารที่ดักจับ หลุดออกจากแผ่นรับประจุ หรือขั้ว

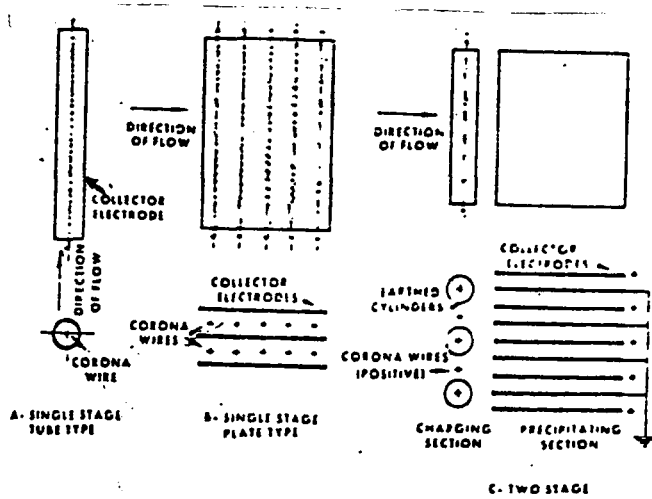


รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในการจับ กับความถี่ในการให้แรงกับระบบ^๑

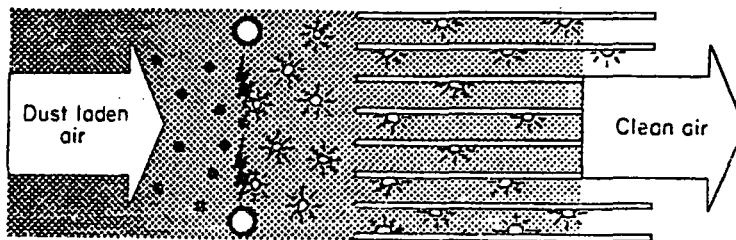
ปล่อย และให้มันตกลงไปในหม้อเก็บฝุ่น (Hopper) เพื่อนำออกจากเครื่องอีกทีหนึ่ง อัตราและความแรงของ การสั่นหรือการสะเทือน มีความสำคัญมาก เพื่อที่จะทำให้ฝุ่นที่ปลิวกลับเข้ามาใน

ระบบมีค่าต่ำที่สุด รูปที่ 2.29 แสดงขนาดของความเร็วของตัวสั้นหรือเคาะ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน

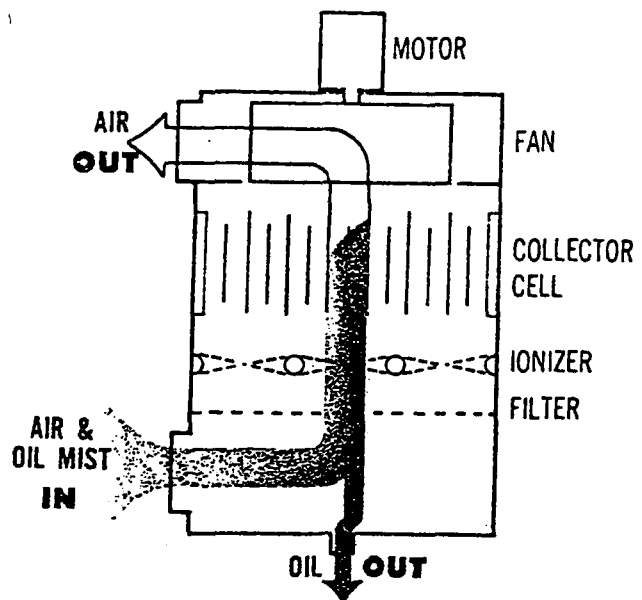
ปัญหาในการสั้นหรือเคาะ ในเครื่องดักจับแบบแห้ง เกิดเนื่องมาจาก ระบบที่ซับซ้อน, การเปราะบางของส่วนต่างๆ ที่เป็นโลหะ และการไม่ทนต่อการปฏิบัติ เมื่ออากาศมีความชื้น, สกปรก และเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย รวมทั้งค่าติดตั้งและบำรุงรักษา เครื่องเคาะหรือสั้นแบบที่นิยม คือ แบบใช้แม่เหล็ก เนื่องจากสามารถทำให้เกิดการสั้นได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถควบคุมได้ง่าย เครื่องดักจับแบบแห้งนี้ สามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 ชนิด คือ แบบ 1 ตอน และ แบบ 2



รูปที่ 2.30 ชนิดของเครื่องดักจับแบบแห้ง



รูปที่ 2.31 หลักการของเครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบ 2 ตอน



รูปที่ 2.32 เครื่องดักจับฝุ่นแบบ 2 ตอน ของ Westinghouse Electric Corp. ⁵

ตอน แบบ 1 ตอน จะใช้การไอออนไนซ์เซชันและรวบรวมอนุภาคในชั้นตอนเดียว ส่วนแบบ 2 ตอนนั้น จะมีการไอออนไนซ์เซชันก่อน แล้วจึงรวบรวมอนุภาค และแบบหลังนี้เหมาะสำหรับรวบรวมฝุ่นที่มีปริมาณมาก

เครื่องดักจับแบบเปียก จะใช้วิธีการล้าง เพื่อนำฝุ่นออก น้ำถูกส่งผ่านวงแหวน เพื่อกำหนดปริมาณน้ำให้แน่นอน จากส่วนบนสุดของตัวรับประจุ น้ำนั้นเมื่อใช้ไปแล้วก็นำไปทำความสะอาด แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และควรใช้น้ำที่สะอาด มีแคลเซียมอิสระอ่อนๆ เป็นส่วนประกอบ และเป็นน้ำไม่กระด้างด้วย ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นในเครื่องดักจับแบบเปียก

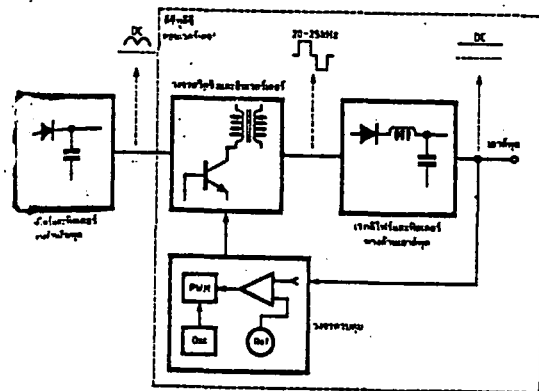
เมื่อเกิดฝุ่นสะสมที่ตัวรับในเครื่องดักจับแบบแห้ง การล้างจึงจำเป็นสำหรับเครื่องดักจับแบบแห้ง โดยทำการล้างด้วยการพ่นน้ำที่มีความเร็วสูง และแรงเพื่อทำให้ฝุ่นที่อาจเกาะติดหนาหลุดออกมาได้ ในบางกรณีการให้น้ำมัน หรือของเหลวที่มีความหนืดสูง หลุดออกมาจากตัวรับประจุ เป็นเรื่องที่ยากยิ่ง เนื่องจากสารประเภทนี้จะเกาะติดแน่นกับตัว จึงต้องใช้ระบบกำจัดเป็นพิเศษ เช่น ใช้น้ำที่มีอุณหภูมิสูงจัดทำความสะอาด เป็นต้น

2.5 หลักการเบื้องต้นของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

ตามรูปที่ 2.33 เป็นแผนผังการทำงานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งทั่วไป ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนด้วยกันคือ

- ภาควงจรเรียงและกรองกระแสขาเข้า
- ภาคอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง
- ภาควงจรเรียงและกรองกระแสขาออก
- ภาคควบคุมการขยายและการหาคความกว้างของสัญญาณ

ไฟสลับแรงดันสูงจะต่อเข้ากับภาควงจรเรียงและกรองกระแสขาเข้า เป็นไฟกระแสตรงแรงดันสูง จากนั้นวงจรอินเวอร์เตอร์จะทำการสวิตช์เปลี่ยนแรงดันไฟตรงเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมความถี่สูงอยู่ในช่วง 20-500 กิโลเฮิร์ต ซึ่งในวงจรสวิตชิ่งนี้อาจจะสร้างได้จากอุปกรณ์หลายชนิด เช่น เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์, เพาเวอร์มอสเฟต, เอสซีอาร์ และอื่นๆ พัลส์สี่เหลี่ยมแรงดันสูง



รูปที่ 2.33 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่ง ¹

จากวงจรสวิตชิ่งจะส่งเข้าหม้อแปลงความถี่สูง เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ และแยกกราวด์ไปในตัว แรงดันที่ได้นี้จะส่งเข้า ภาคเรกติไฟร์และฟิลเตอร์ด้านเอาต์พุต อีกครั้งเป็นไฟตรงตามระดับแรงดันที่ต้องการ ส่วนหนึ่งจะถูกส่งกลับมาเข้าวงจรควบคุม เพื่อคอยตรวจสอบและควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ไม่ว่าจะแรงดันไฟสลับด้านอินพุตหรือโวลต์ที่เอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงไปบ้างก็ตาม

ส่วนควบคุมประกอบด้วย วงจรกำเนิดความถี่ เพื่อป้อนแก่วงจรพัลส์มอดูเลเตอร์ (PWM), วงจรขยายความผิดพลาด และส่วนของแรงดันอ้างอิง เมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันเอาต์พุตกับแรงดัน

อ้างอิง แล้วจะส่งค่าความผิดพลาดนั้นไปทำการปรับปรุ้ความกว้างของพัลส์ของ PWM ขบวนการพัลส์ที่ได้จะส่งมาควบคุมวงจรรีจิวซึ่งให้เปิด-เปิดสวิทซ์ และ ปล่อยกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยไปสู่โหลดทำให้โหลดมีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาท์พุทให้คงที่

นอกจากนี้ สวิทซ์เพาเวอร์ซัพพลายยังต้องมีส่วนประกอบอื่นๆ อีก เช่น วงจรกรอง RFI, วงจรป้องกันไฟกระชาก, วงจรจำกัดกระแส, วงจรป้องกันแรงดันเอาต์พุตเกิน ฯลฯ

2.5.1 คิวตี้คอนเวอเตอร์

ในรูปที่ 2.33 จะเห็นได้ว่าในส่วนของคิวตี้คอนเวอเตอร์ประกอบด้วย

- อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง
- ภาควงจรรีจิวและกรองกระแสขาออก
- วงจรควบคุม

วงจรควบคุม ทำหน้าที่ป้อนพัลส์ที่เหลี่ยมความถี่สูง (20-500 กิโลเฮิร์ต) ที่สามารถควบคุมความกว้างของพัลส์ให้กับภาคอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะแปลงไฟตรงแรงดันสูง จากนั้นจึงทำการปรับขนาดแรงดันตามต้องการ โดยหม้อแปลงความถี่สูงจะส่งเข้า ภาควงจรรีจิวและกรองกระแสขาออกได้ตามต้องการ ส่วนสำคัญของคิวตี้คอนเวอเตอร์ คือ อินเวอร์เตอร์ความถี่สูงกับวงจรรีจิวและกรองกระแสขาออก รวมเรียกสั้นๆ ว่า คอนเวอเตอร์

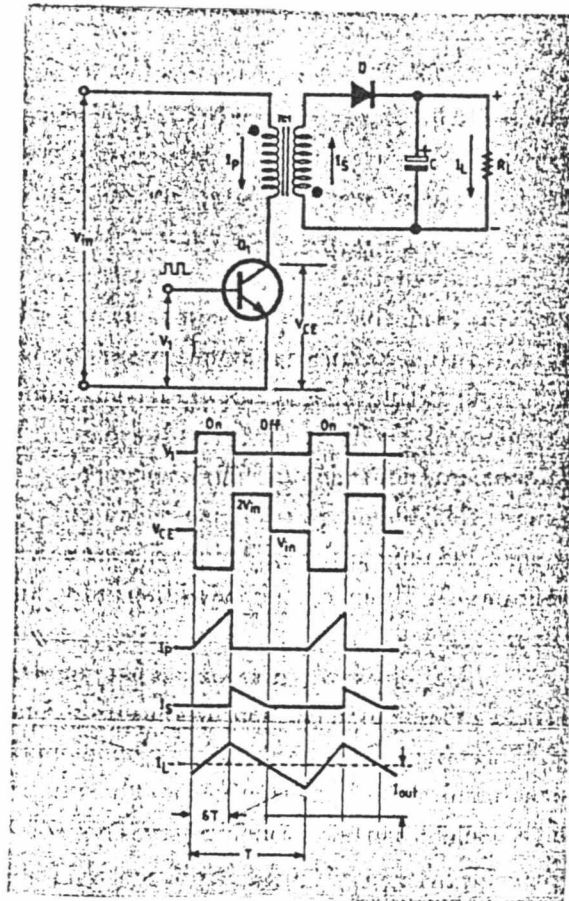
แม้ว่าคอนเวอเตอร์มีอยู่หลายรูปแบบ แต่ก็ล้วนมีพื้นฐานมาจากวงจร 3 แบบ คือ

- ฟลายแบ็คหรือบัคบูสต์ (Flyback or Buck-Boost)
- ฟอว์เวิร์ดหรือบัค (Forward or Buck)
- พูช-พูลหรือบัคดีไรฟ์ (Push-Pull or Buck-Derived)

2.5.1.1 คอนเวอเตอร์แบบฟลายแบ็ค

คอนเวอเตอร์แบบฟลายแบ็คที่ใช้กันในทางปฏิบัติในรูปที่ 2.34 พร้อมด้วยรูปคลื่นของสัญญาณตามจุดต่างๆ เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแส กระแสจะไหลผ่านชดปรุ้หมุ่และสะสมพลังงานไว้ แต่แรงดันที่เกิดขึ้นที่ชดปรุ้หมุ่จะมีขั้วตรงกันข้ามกับชดปรุ้หมุ่ (สังเกตจากจุดที่ชดปรุ้หมุ่และทุติยภูมิ) ดังนั้นจึงไม่มีพลังงานปล่อยไปยังโหลด เพราะไดโอดถูกไบแอสกลับ และ เมื่อ Q_1 หยุดนำกระแส ชดปรุ้หมุ่ของหม้อแปลงจะคายพลังงานออกมา แต่ขั้วแรงดันจะกลับกัน ทำให้ไดโอดด้านทุติยภูมิได้รับไบแอสตรงนำกระแสผ่านไปยังโหลดและเก็บประจุที่ C แม้ว่าหม้อแปลงจะทำหน้าที่แยกจากกันทางไฟฟ้าแล้ว ยังกระทำตัวเป็นโ้คอีกด้วย ซึ่งในทางทฤษฎีไม่จำ

เป็นต้องใส่ตัวเหนี่ยวนำค่าน้อยๆ ไว้ตรงระหว่าง ไดโอดและตัวเก็บประจุ เพื่อทำการกำจัดสัญญาณรบกวน EMI/RFI ที่เกิดจากการสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์เอง



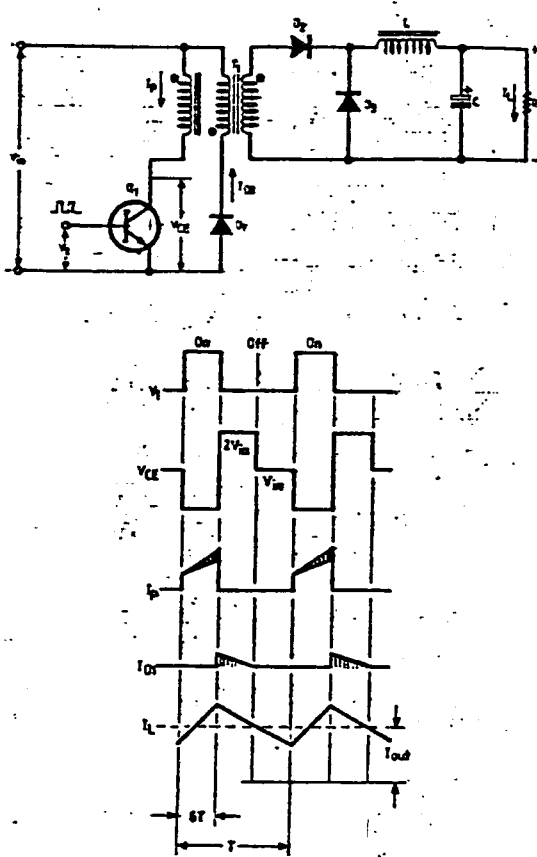
รูปที่ 2.34 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็ค¹

2.5.1.2 คอนเวอร์เตอร์แบบฟอร์เวิร์ด

มีลักษณะวงจรและรูปคลื่นสัญญาณตามจุดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.35 เมื่อ Q_1 ทำงาน จะมีกระแสไหลผ่านขดลวด (ด้านซ้าย) ของหม้อแปลง และเก็บพลังงานไว้ในรูปสนามแม่เหล็ก นอกจากนั้นยังส่งสนามแม่เหล็กบางส่วนไปคล้องเกี่ยวอีก 2 ขดที่เหลือ โดยแรงดันที่จุดของปฐมภูมิและทุติยภูมิจะมีขั้วเหมือนกันตลอด ดังนั้นในขณะนั้นจึงมีกระแสไหลผ่านไดโอด D_2 ไปสะสมพลังงานในตัวเหนี่ยวนำ และส่งต่อไปยังโหลด R_L ส่วน D_3 จะถูกไบแอสกลับ

เมื่อ Q_1 หยุดทำงานสนามแม่เหล็กในหม้อแปลงจะยุบตัว ทำให้ขั้วแรงดันที่จุดทางด้านทุติยภูมิเปลี่ยนเป็นลบ D_2 จึงถูกไบแอสกลับ ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำจึงคายพลังงานโดยผ่าน R_L และ D_3

สำหรับขดลวดขดกลาง (ดีแมกนีไทเซชั่น) ของหม้อแปลง T_1 นั้นจะทำหน้าที่หักล้างสนามตกค้าง เมื่อ Q_1 หยุดทำงาน โดยจะส่งพลังงานแม่เหล็กด้านกลับจากทิศทางเดิมในรูปของกระแส



รูปที่ 2.35 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แบบฟอร์เวิร์ด¹

ซึ่งก็คือพื้นที่ส่วนที่แรงเงาแบบรูปคลื่น I_p และ I_{D1} นั้นเอง คำนวณหาได้จาก

$$I_{max} = T_{(max)} V_{in} / L$$

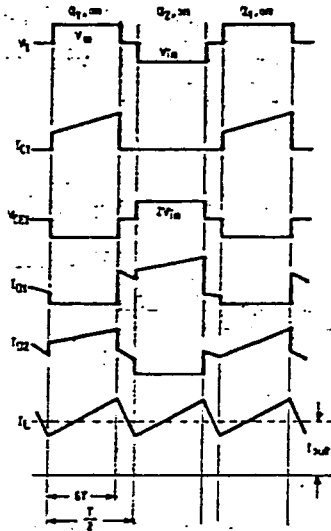
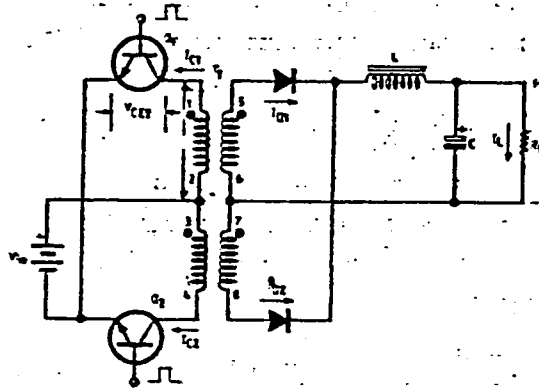
เมื่อ $T_{(max)}$ คือ ช่วงเวลาที่ Q_1 นำกระแส และ L คือ ค่าของตัวเหนี่ยวนำที่เอาต์พุต (ไมโครเฮนรี่)

2.5.1.3 คอนเวอร์เตอร์แบบพัช-พูล

คอนเวอร์เตอร์แบบนี้ เป็นการนำคอนเวอร์เตอร์แบบฟอร์เวิร์ด 2 วงจรมาต่อร่วมกัน โดยให้ทำงานแบบผลัดกันส่งพลังงานไปยังโหลดในแต่ละครึ่งไซเคิล

ลักษณะวงจรเบื้องต้นของคอนเวอร์เตอร์แบบพัช-พูล และ รูปคลื่นสัญญาณตามจุดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.36 เมื่อ Q_1 นำกระแสก็จะมีกระแสไหลผ่านขดปฐมภูมิของ T_1 จากจุด 2 ไปยังจุด

1 ดังนั้นจุด 5 และ 7 ทางด้านขดทุติยภูมิ จึงถูกไบแอสกลับ ในขณะที่ D_2 ได้รับไบแอสตรงนำ กระแส I_{D_2} ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและโหลด



รูปที่ 2.36 คอนเวอร์เตอร์แบบพุช-พูลและรูปคลื่นสัญญาณตามจุดต่างๆ¹

เช่นเดียวกันเมื่อ Q_2 นำกระแสก็จะมีกระแสไหลผ่านจากจุด 3 ไปจุด 4 ของขดปฐมภูมิทำให้ที่จุด 5 และ 7 มีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับจุด 6 และ 8 ตามลำดับ D_1 จึงนำกระแส I_{D_1} ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและโหลด ในขณะที่ D_2 ถูกไบแอสกลับ แรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมโหลด R_L สามารถหาได้จากสูตร

$$V_{out} = 2 \delta_{(max)} V_{in} (N_s / N_p)$$

โดยที่ค่า δ_{max} จะต้องมีค่าต่ำกว่า 0.5 เพื่อไม่ให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองนำกระแสพร้อมกัน ซึ่งจะ
ทำให้พังทั้งคู่ ดังนั้นถ้าสมมติให้ $\delta_{max} = 0.4$ จะได้ $V_{out} = 0.8 V_{in} (N_S/N_P)$

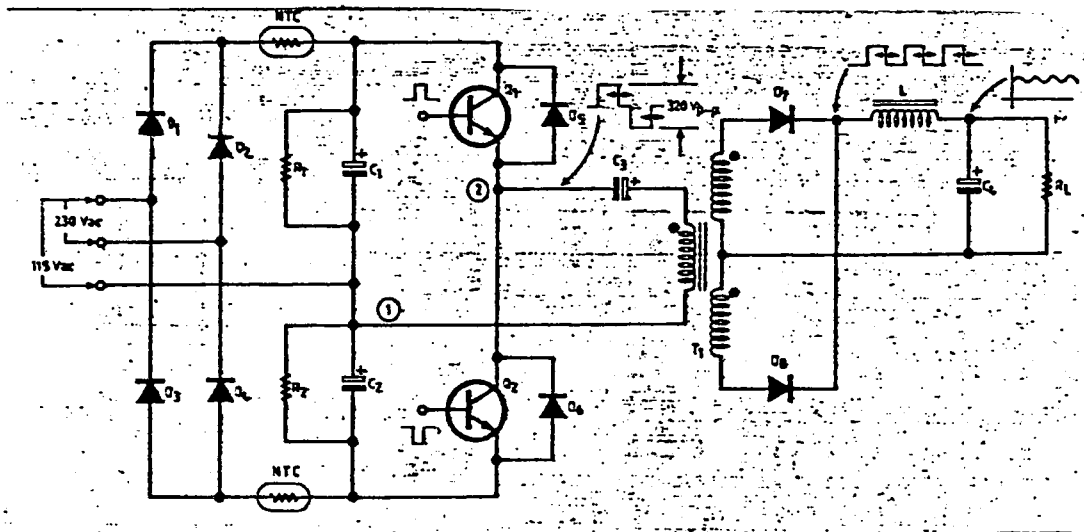
2.5.1.4 คอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์

คอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์จัดว่าเป็นตระกูลเดียวกับพืซ-พุล เพราะใช้หลัก
การเดียวกันคือ ใช้อุปกรณ์สวิทช์ 2 ตัว ช่วยกันส่งพลังงานไปที่โหลด ดูได้จากรูปที่ 2.37

จากรูปสังเกตได้ว่า ขดปฐมภูมิแต่ละด้านของหม้อแปลงจะถูกต่ออยู่กับจุดที่มีแรงดันไฟตรงเป็น
ครึ่งหนึ่ง หรือประมาณ $160 V_{dc}$ ที่มีขั้วต่างกัน โดยมีทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 เป็นตัวสวิทช์
ตัดต่อ ทำให้ได้คลื่นสี่เหลี่ยมที่มีขนาดแรงดัน $320 V_{p-p}$ ป้อนแก่ขดปฐมภูมิของหม้อแปลง จากนั้น
จึงทำการเรียงและกรองแรงดันทางเอาต์พุตของขดทุติยภูมิด้วย D_1, D_2, L และ C_4 ได้เป็นไฟ
กระแสตรงป้อนแก่โหลด

ลักษณะการทำงานของวงจรนี้ แรงดันที่ตกคร่อม Q_1 และ Q_2 ขณะไม่ทำงานมีค่าน้อย
กว่าแรงดันอินพุตครึ่งหนึ่ง จึงสามารถใช้ทรานซิสเตอร์ที่ทนแรงดันไม่สูงนักได้ แต่ในลักษณะการทํ
างานเช่นนี้ก็มีข้อเสียเช่นกันคือ กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ขณะทำงานจะมีค่าเป็น 2 เท่าของ
แบบพืซ-พุล

จุดประสงค์หนึ่งของวงจรนี้คือ ทำให้พื้นที่ทั้ง 2 ทิศทางของกราฟ B-H เท่ากันโดยอัตโนมัติ
เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้แกนของหม้อแปลงอิ่มตัว จากรูปที่ 2.38 แสดงให้เห็นว่าทรานซิสเตอร์ (Q_1

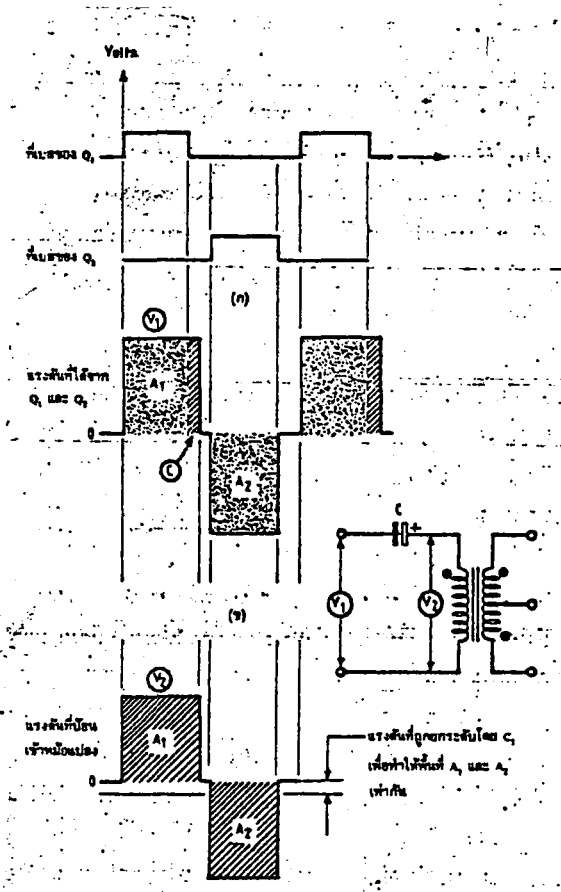


รูปที่ 2.37 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ 1

และ Q_2) ที่มีคุณสมบัติการสวิตซ์ที่ไม่เท่ากัน เช่น Q_1 หยุดทำงานช้ากว่า Q_2 ก็จะเป็นพื้นที่ C ดังรูปที่ 2.38 (ก) ซึ่งแสดงแรงดันที่เกิดขึ้นมา ถ้าปล่อยแรงดันซึ่งมีรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและลบไม่เท่ากันนี้ไปขับหม้อแปลง ก็จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างขึ้นมาได้ ทำให้แกนของหม้อแปลงอิ่มตัว และ ทรานซิสเตอร์อาจจะพังในที่สุด วงจรนี้จึงใช้วิธีแก้ โดยใส่ตัวเก็บประจุ C_3 ไว้ค้ำปลั่งสัญญาณก่อน ป้อนแก่ชุดปฐมภูมิของหม้อแปลง C_3 จะทำการเลื่อนระดับไฟตรงของสัญญาณ เพื่อชดเชยให้พื้นที่ A_1 และ A_2 เท่ากัน ดังรูปที่ 2.38 (ข)

2.5.1.5 คอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

แม้ว่าจะประสบความสำเร็จจาก วงจรฮาล์ฟบริดจ์ ในการลดแรงดันตกคร่อม ทรานซิสเตอร์ลงมาครึ่งหนึ่งของ V_{ce} และป้องกันไม่ให้แกนของหม้อแปลงอิ่มตัวแล้ว แต่ว่ากระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ ขณะทำงานกลับเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของแบบพุก-พูล ดังนั้นจึงมักใช้คอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ ในงานที่ใช้กำลังต่ำและปานกลางไม่สูงมากนัก เพราะว่าเพาเวอร์-

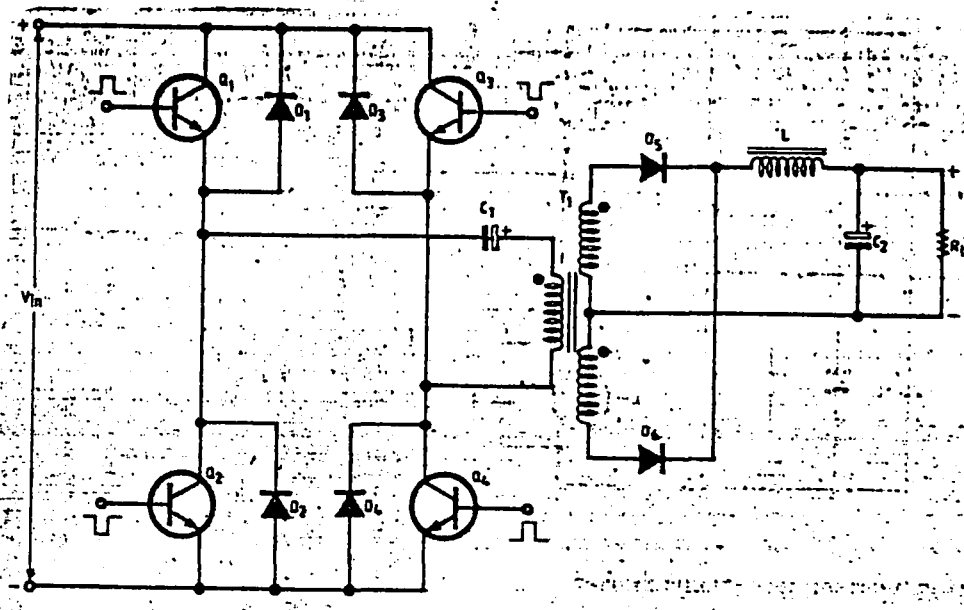


รูปที่ 2.38 กราฟแสดงผลที่เกิดจากการใส่ตัวเก็บประจุในวงจรฮาล์ฟบริดจ์ ¹

ทรานซิสเตอร์ หรือ เพาเวอร์มอสเฟต ที่ทนแรงดันประมาณ 400 ถึง 500 โวลต์ แต่ทนกระแสสูงๆ หายากและมีราคาแพง ด้วยเหตุนี้จึงได้เกิดวงจรฟูลบริดจ์ ซึ่งรวมลักษณะเด่นด้านแรงดันของวงจรฮาล์ฟบริดจ์ และด้านกระแสของวงจรpush-pull ไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.39 โดยการทำงานของทรานซิสเตอร์ Q_1 ซึ่งนำกระแสพร้อมกับ Q_4 และ Q_2 นำกระแสพร้อมกับ Q_3 โดยแต่ละคู่จะผลัดกันทำงาน

จากการทำงานเช่นนี้ จึงทำให้แรงดันที่ขั้วประมุขของหม้อแปลง มีแรงดันเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง $+V_{in}$ และ $-V_{in}$ ดังนั้นแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ (V_{CE}) ขณะไม่นำกระแสจึงไม่มากไปกว่า V_{in} อีกทั้งกระแสที่ไหลผ่านก็ยังเท่ากับวงจรpush-pull ด้วย

แต่ข้อเสียของวงจรนี้ก็คือ ต้องใช้ทรานซิสเตอร์ถึง 4 ตัว และเนื่องจากต้องให้คู่ทรานซิสเตอร์แต่ละคู่ออกจากกันโดยเด็ดขาด



รูปที่ 2.39 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ¹

นอกจากนี้ ยังมีคอนเวอร์เตอร์แบบอื่นๆ อีกมากมาย ที่เป็นวงจรที่พัฒนามาจากวงจรต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วนี้ สำหรับคอนเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้ในโครงการนี้นั้น คือ คอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็ค ดังนั้นจากนี้ไปจะขออธิบายรายละเอียดเฉพาะ แหล่งจ่ายไฟสวิทชิงที่ใช้คอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็ค

2.5.2 การออกแบบวงจรเรียงและกรองกระแสขาเข้า

2.5.2.1 การออกแบบวงจรเรียงกระแสขาเข้า

เมื่อเราเลือกวงจรเรียงกระแสเป็นแบบบริดจ์แล้ว สิ่งที่ต้องพิจารณาต่อไป ในการเลือกวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ที่เหมาะสมกับวงจรคือ

(ก) ความสามารถในการรับกระแสสูงสุดขณะนำกระแส ซึ่งขึ้นกับขนาดกำลังของแหล่งจ่ายไฟสวิตซ์ที่เราต้องการ และ ไดโอดที่เลือกจะต้องมีค่าความสามารถในการรับกระแส ที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการคำนวณอย่างน้อยสองครั้ง

(ข) ความสามารถในการทนแรงดันย้อนกลับสูงสุด (PIV) เราจะต้องเลือกไดโอดที่มีค่านี้มากกว่าหรือเท่ากับ 600 โวลต์

(ค) ความสามารถในการทนกระแสกระชากได้ขณะเปิดเครื่อง

2.5.2.2 การออกแบบตัวเก็บประจุในวงจรกรองกระแสขาเข้า

การออกแบบตัวเก็บประจุในส่วนนี้มีความสำคัญมาก เนื่องจากว่า จะมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้ากระแสที่ขาออกของแหล่งจ่ายไฟ ปกติจะใช้ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสามารถที่จะทนกระแสกระเพื่อมได้สูง และมีความต้านทานแสงน้อย ตัวต้านทาน R_4 และ R_5 ใช้ในการคายประจุจากตัวเก็บประจุ เมื่อปิดแหล่งจ่ายไฟ

สูตรในการคำนวณค่าตัวเก็บประจุหาได้จาก

$$C = It / V$$

เมื่อ C คือ ค่าตัวเก็บประจุ (F), I คือ กระแสที่ผ่านโหลด (A), t คือ เวลาที่ตัวเก็บประจุจะต้องใช้ในการให้กระแส (s), V คือ ค่าแรงดันกระแสเพิ่มที่ยอมรับได้ (V)

2.5.3 การออกแบบคอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็ค

2.5.3.1 การคำนวณหาทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็นเสมือนสวิตซ์ในคอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็ค ต้องทน

ค่าแรงดันสูงสุดระหว่าง ซาโคลเลคเตอร์และอิมิเตอร์ ขณะเปิด และกระแสคอลเลคเตอร์สูงสุดที่ จะไหลผ่านขณะเปิด โดยค่าแรงดันสูงสุดซึ่งทรานซิสเตอร์จะต้องทนได้คือ

$$V_{CE,max} = V_{in} / (1 - \delta_{max}) \tag{2.5.1}$$

เมื่อ V_{in} คือ แรงดันตรงขาเข้า, δ_{max} คือ ค่ารอบเวลาการทำงานสูงสุด

จากสมการ 2.5.1 จะเห็นว่าถ้าต้องการจะให้ $V_{CE,max}$ มีค่าน้อย δ_{max} จำเป็นจะต้อง มีค่าน้อยด้วย โดยปกติจะให้ยู่ต่ำกว่า 50% นั่นคือ $\delta_{max} < 0.5$ ซึ่งในการปฏิบัติจะใช้ค่า 0.4 ซึ่งจะจำกัดค่า $V_{CE,max}$ ให้แคบลงเหลือ $V_{CE,max}$ น้อยกว่าหรือเท่ากับ $2.2 V_{in}$

จากนั้นก็พิจารณาทรานซิสเตอร์ขณะเปิด ซึ่งกระแสคอลเลคเตอร์ที่ไหลผ่านจะมีค่าเป็น

$$I_c = I_L / n = I_p$$

เมื่อ I_p คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง, n คือ อัตราส่วน จำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิต่อกทุติยภูมิ, I_L คือ กระแสโหลดขาออก

ทำการแปลงสมการ (2.5.1) ให้อยู่ในรูปกำลังขาออกและแรงดันขาเข้า ก็จะได้สมการการถ่าย เทพพลังงานในขดลวด คือ

$$P_{out} = [L(I_p)^2 / 2T] \eta \tag{2.5.2}$$

โดย η คือ ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์

เมื่อแรงดันคร่อมหม้อแปลงคือ

$$V_{in} = L di/dt \tag{2.5.3}$$

ถ้าสมมติให้ $di = I_p$ และ $1/dt = f/\delta_{max}$ แล้วนำไปแทนในสมการ 2.5.3 จะได้

$$V_{in} = LI_p f / \delta_{max}$$

หรือ

$$L = V_{in} \delta_{max} / I_p f$$

นำไปแทนในสมการ 2.5.2 จะได้ว่า

$$P_{out} = [V_{in} f \delta_{max} (I_p)^2 / 2f I_L] \eta = V_{in} \eta \delta_{max} I_p / 2$$

$$I_p = 2P_{out} / \eta V_{in} \delta_{max} = I_c \tag{2.5.4}$$

นี่คือสมการแสดงค่ากระแสคอลเลคเตอร์สูงสุดที่ทรานซิสเตอร์จะต้องทนได้ขณะเปิด

2.5.3.2 การหันหม้อแปลงความถี่สูง

ขั้นที่ 1 หากกระแสที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิสูงสุด

อันดับแรก หาค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิสูงสุดเสียก่อน ซึ่งมีค่าเท่ากับค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านขดลวดคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ จากความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่าง ศักย์ไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำ

$$V = L di/dt \tag{2.5.1}$$

เนื่องจาก เป็นฟลายแบ็คที่ทำงานในแบบการส่งถ่ายพลังงานแบบสมบูรณ์ (The Complete Energy Transfer Mode) กระแสไหลจากจุดเริ่มต้นไปยังค่าสูงสุดในช่วงเวลา t_c ทรานซิสเตอร์ ทำงานเหมือนสวิตช์ปิด ค่าศักย์ขาเข้าจะมีค่าเป็น

$$V_{in} = L_p I_{pp} / I_c \tag{2.5.2}$$

เมื่อใช้ $1/t_c = f/\delta_{max}$ ดังนั้นจะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$V_{in.min} = L_p I_{pp} f / \delta \tag{2.5.3}$$

เมื่อ V_{in} คือ ศักย์ตรงขาเข้า (V), L_p คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ (H), I_{pp} คือ ค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิสูงสุด (A), δ_{max} คือ รอบการทำงานสูงสุด (Maximum Duty Cycle) (s), f คือ ความถี่ในการสวิตช์ (kHz)

ค่ากำลังงานของการทำงานแบบส่งถ่ายพลังงานแบบสมบูรณ์ จะมีค่าเท่ากับพลังงานที่สะสมไว้ในแต่ละรอบการทำงานคูณกับความถี่ใช้งาน

$$P_{out} = [L_D (I_{DP})^2 f] / 2 \tag{2.5.4}$$

สมการที่ 2.5.4 หา สหการที่ 2.5.3

$$P_{out} / V_{in,min} = [L_D (I_{DP})^2 f] / 2L_D I_{DP} f$$

จัดรูปเสียใหม่จะได้ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิเป็น

$$I_{DP} = I_C = 2P_{out} / V_{in,min} \delta_{max} \tag{2.5.5}$$

ขั้นที่ 2 หาความสัมพันธ์ระหว่าง รอบการทำงานสูงสุดและต่ำสุด ในคอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็ค การทำให้แรงดันมีค่าคงที่ ทำได้โดยอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ แล้ว สัญลักษณ์ที่ใช้ δ_{min} และ δ_{max}

ถ้าคิกซ์ซาเข้าเปลี่ยนแปลงจาก $V_{in,min} - V_{in,max}$ ดังนี้

$$\delta_{min} = \delta_{max} / (1 - \delta_{max})K + \delta_{max} \tag{2.5.6}$$

เมื่อ
$$K = V_{in,max} / V_{in,min} \tag{2.5.7}$$

ขั้นที่ 3 คำนวณค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ

เนื่องจากทราบค่ากระแสสูงสุดแล้ว ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิจะหาได้จาก

$$L_D = V_{in,min} \delta_{max} / I_{DP} f \tag{2.5.8}$$

ขั้นที่ 4 เลือกขนาดของแกน

โดยเลือกขนาดของแกน, ชนิด และรูปร่าง ที่เหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้ โดยดูคุณสมบัติของแกนได้จากข้อมูลของผู้ผลิตแกนชนิดนั้นๆ

โดยเมื่อ A_c คือ พื้นที่การพันขดลวด, A_w คือ พื้นที่สัมพันธ์ของแกน (ค่าทั้งสองจะอยู่ในข้อมูลของผู้ผลิต)

$$A_c A_o = (25.32 L_D I_{DD} D) 10^8 / \beta_{max} \quad (2.5.9)$$

เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดที่จะนำมาพันเป็นขดปฐมภูมิ

และ $B_{max} = B_{sat} / 2$ เมื่อ B_{sat} คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัว (ซึ่งจะกำหนดอยู่ในข้อมูลของผู้ผลิต) โดยสมการ 2.5.9 เป็นเพียงแค่การประมาณค่าเท่านั้น การเลือกขนาด จึงควรเลือกใหญ่กว่าค่าที่คำนวณได้ เพื่อป้องกันการผิดพลาด

ขั้นที่ 5 คำนวณค่าความยาวของช่องอากาศของแกน (The Core Air Gap Length)

เนื่องจาก คอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็ค ทำงานในแบบปลายข้างเดียว (Single - Endedly) นั่นคือ ตัวหม้อแปลง (ขดลวด) ใช้ความจุของฟลักซ์เพียงครึ่งเดียว เนื่องจากค่ากระแส และ ค่าฟลักซ์จะไม่ติดลบ ซึ่งการทำงานแบบนี้อาจทำให้เกิดปัญหาการอิ่มตัวของแกน (Core Saturation) ได้ เพื่อจัดการกับปัญหานี้มีวิธีการ 2 อย่าง คือ 1) ใช้แกนที่มีปริมาตรใหญ่มาก หรือ 2) เพิ่มช่องอากาศเข้าไปในทางเดินของฟลักซ์เพื่อทำให้ ฮิสเทอรีซิสลูปเตี้ยลง (Flatten The Hysteresis Loop) ซึ่งจะทำความหนาแน่นฟลักซ์ลดลง โดยวิธีที่ 2 จะเหมาะสมด้วยเหตุผลหลายประการ ทั้งทางด้านเศรษฐกิจ และขนาดของแหล่งจ่ายไฟ

ช่องอากาศจะทำให้เกิด ในทางเดินของฟลักซ์พลังงานส่วนใหญ่ที่สะสมในขดลวดในแกนหม้อแปลง เมื่อมีปริมาตรของช่องอากาศ v_x และความยาวของช่องอากาศ l_x คือ

$$[L_D (I_{DD})^2] / 2 = (B_{max} H v_x) 10^8 / 2$$

เมื่อ $v_x = A_o l_x$

และ $\mu_o H = B_{max} / 0.4\pi$

โดย μ_o คือ เอมมีออบิลิตีของอากาศ (Air Permeability) = 1 ดังนั้นค่าความยาวของช่องอากาศ, l_x มีค่าเป็น

$$l_x = [0.4\pi L_D (I_{DD})^2] 10^8 / A_o (B_{max})^2 \quad \text{cm} \quad (2.5.10)$$

ขั้นที่ 6 คำนวณค่าจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ

เมื่อทราบช่องอากาศ ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$N_D = B_{max} I_{D1} / 0.4\pi I_{DD} \quad (2.5.11)$$

ซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่าที่หาได้จาก

$$N_D = (L_D I_{DD}) 10^8 / A_D B_{max} \quad (2.5.12)$$

ขั้นที่ 7 คำนวณหาค่าของจำนวนรอบของขดลวดกตุติภูมิ

จะต้องใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าขาออก (V_D) เมื่อศักย์ไฟฟ้าขาเข้า (ศักย์ในขดลวดปฐมภูมิ) มีค่าน้อยที่สุด . เมื่อใช้รอบการทำงานที่ค่าสูงสุด ซึ่งจะมีค่าเป็น $V_{in.min} = 1.4V_{in,ac} - 20V$ เมื่อ 20V คือ ค่าแรงดันกระเพื่อม และ ศักย์ที่ตกคร่อมไดโอด สามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า และ จำนวนรอบขดลวดได้จาก

$$V_{out} + V_D = V_{in.min} (\delta_{max} / 1 - \delta_{max}) (N_D / N_p)$$

ทำการจัดรูปสมการจะได้ว่า

$$N_D = N_p (V_D + V_o) (1 - \delta_{max}) / V_{in.min} \delta_{max} \quad (2.5.13)$$

2.5.4 OUTPUT SECTION

ภาคขาออกของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง เป็นการนำแรงดันขาออกของหม้อแปลงจากขดลวดกตุติภูมิมาทำการเรียงและกรอง และในบางกรณีอาจต้องการตัวทำให้แรงดันมีค่าคงที่สม่ำเสมอ (Regulator) เพิ่มเติม แล้วแต่การนำไปประยุกต์ใช้ โดยแรงดันที่ออกมาจากหม้อแปลงจะเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่สูง ดังนั้นจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น ในตัวเรียงกระแสแบบชอตกี (Schotky), ตัวตอบสนองเร็ว (Fast Recovery) หรือตัวกรองที่มีค่าความต้านทานแฝงต่ำมาก เพื่อลดสัญญาณรบกวนให้ได้มากที่สุด

2.5.4.1 รูปแบบขอบตัวเรียงและกรองกระแสขาออก

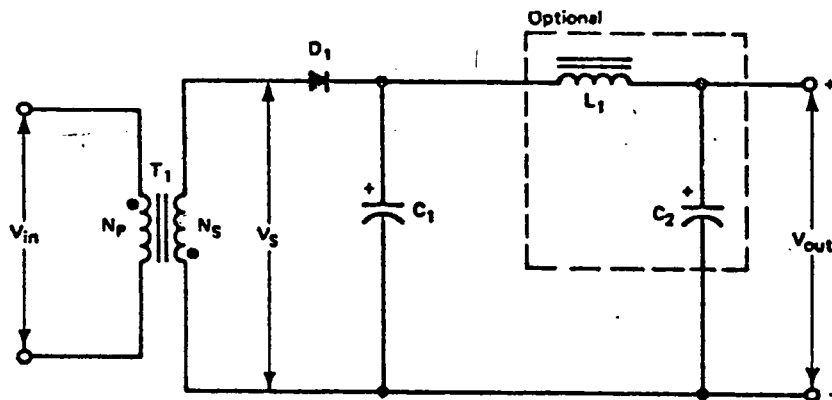
รูปแบบของตัวเรียงและกรองกระแส จะขึ้นอยู่กับ ชนิดของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในแหล่งจ่ายไฟ เนื่องจากในโครงการพิเศษนี้ ใช้คอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็ค ดังนั้นจึงจะกล่าว

เฉพาะที่ใช้กับฟลายแบ็คเท่านั้น จากรูป 2.40 แสดงถึงภาคขาออกของคอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็ค เนื่องจากหม้อแปลง T_1 ทำหน้าที่เป็นขดลวดสะสมพลังงานด้วยอยู่แล้ว ดังนั้นไดโอด D_1 และตัวเก็บประจุ C_1 จึงเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องเพิ่มเติมอีกเล็กน้อย เพื่อให้ได้แรงดันตรงขาออก แต่ในการประยุกต์ใช้กับงานบางชนิดอาจมีส่วนเพิ่มเติม คือ ตัวกรอง LC ที่อยู่ในกรอบไข่ปลา เพื่อที่จะลดแรงดันกระเพื่อมให้เหลือค่าน้อยที่สุด

ปัจจัยสำคัญในการออกแบบภาคขาออกของแหล่งจ่ายไฟ ก็คือ อัตราการทนแรงดันย้อนกลับของอุปกรณ์ โดยไดโอด D_1 จะต้องทนแรงดันได้ในอัตรา

$$PIV_{diode} = [1.2 V_{in} (N_s/N_p)]$$

เมื่อ N_s/N_p คือ อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิต่อขดลวดปฐมภูมิ, V_{in} คือ แรงดันตรงขาเข้าของหม้อแปลง



รูปที่ 2.40 แสดงส่วนวงจรขาออกของแหล่งจ่ายไฟสวิทช์แบบฟลายแบ็ค¹

แต่เนื่องจากสัญญาณที่จะใช้เรียงกระแสเป็นสัญญาณความถี่สูง ดังนั้นไดโอดที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติพิเศษ กล่าวคือ จะต้องมีความต้านทานย้อนกลับต่ำ มีการตอบสนองต่อสัญญาณเร็ว และสามารถทนกำลังที่จะเข้าสู่ตัวมันได้ ซึ่งมีไดโอดที่มีคุณสมบัติดังกล่าวอยู่ 3 ชนิด คือ

- (ก) High-Efficiency Fast Recovery
- (ข) High-Efficiency Very Fast Recovery
- (ค) Schottky Barrier Rectifier

รูปที่ 2.41 แสดงคุณสมบัติเมื่อไดโอดนำกระแสเปรียบเทียบกับทั้ง 3 ชนิด โดยจากกราฟจะ

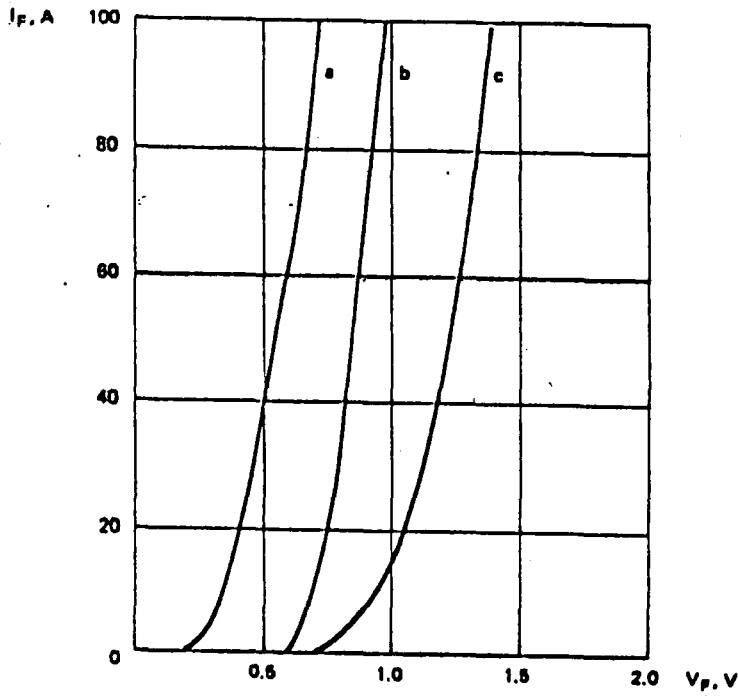
พบว่า Schottky Barrier จะต้องการแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำสุด ซึ่งก็จะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดเช่นกัน

การคำนวณ ค่ากระแสสูงสุดที่ไดโอดจะต้องทนได้นั้น เมื่อพิจารณาคอนเวอเตอร์แบบฟลายแบ็คแล้ว ภาคขาออกจะนำกระแสเฉพาะในรอบการทำงาน คือ เมื่อทรานซิสเตอร์ปิด ก็คือ ไดโอดจะต้องนำกระแสได้สูงสุด เช่นเดียวกับค่ากระแสที่ไหลออกมาจากหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิ ค่ากระแสขณะนำกระแสต่ำสุด ซึ่งไดโอดจะต้องทนได้คือ

$$I_{FM} = 2I_{out} / (1 - \sigma_{max})$$

เมื่อ σ_{max} คือ ตอการทำงานสูงสุดของการสวิตช์

การเลือกตัวเก็บประจุ สำหรับภาคกรองขาออกของแหล่งจ่ายไฟ ก็เหมือนกับภาคเรียงกระแส คือ ขึ้นอยู่กับชนิดของคอนเวอเตอร์เช่นกัน



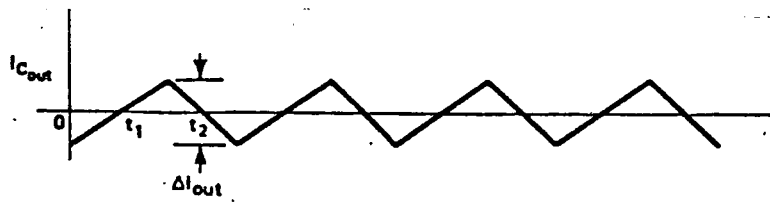
รูปที่ 2.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสและแรงดัน เมื่อไดโอดนำกระแส ที่ค่ากระแสต่างๆ กัน a) Schottky Barrier Rectifier b) Very Fast Recovery Rectifier c) Conventional Fast Recovery Rectifier

2.5.4.2 การออกแบบตัวเก็บประจุ ในวงจรกรองกระแสขาออก

ในการเลือกชนิดของตัวเก็บประจุนั้นขึ้นอยู่กับ ชนิดของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้รวมถึงค่ากระแสสูงสุดและความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ด้วย แบบที่นิยมใช้ที่สุดในปัจจุบันเป็นแบบอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งให้ค่าความต้านทานแฝง (ESR) ต่ำ ค่าความต้านทานแฝงของตัวเก็บประจุจะมีผลอย่างมากกับแรงดันกระเพื่อมที่ได้อีก รวมทั้งมีผลต่ออายุของตัวเก็บประจุนั้นด้วย เนื่องจากเหมือนเป็นตัวต้านทานอีกตัวหนึ่ง ซึ่งจะก่อให้เกิดกำลังขึ้นในตัวมัน โดยจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น อันอาจจะทำให้เสียหายได้

ตัวเก็บประจุในปัจจุบันจะมีช่วงอุณหภูมิทำงานสูงถึง 150 องศาเซลเซียส และมีค่าความต้านทานแฝงต่ำมากที่ความถี่มากกว่า 20 กิโลเฮิร์ต ขณะที่บางชนิดสูงถึง 100 กิโลเฮิร์ต ที่เดียว (ตัวเก็บประจุชนิดฟิล์ม, Film Type Capacitor)

จากรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสและแรงดัน ของ PWM ¹

จะเห็นว่ารูปคลื่นของกระแสขาออกของตัวเก็บประจุ จะมีค่าอยู่ตรงกลาง (ที่ศูนย์) และมีขนาด (Amplitude) I จะสังเกตเห็นได้ว่า รูปคลื่นกระแสที่ข้ามเส้นอ้างอิงที่ศูนย์ในทิศทางบวก คือ t_1 ซึ่งเป็นช่วงเวลาเปิด (On-Time) และในทิศทางลบ คือ t_2 ซึ่งเป็นช่วงเวลาปิด (Off-Time) ดังนั้นค่ากระแสจะทำให้เกิดแรงดันกระเพื่อม (Ripple) V ซึ่งจะหาได้จาก

$$V_{out} = 1/C_{out} \int_{t_1}^{t_2} i dt \tag{2.5.14}$$

แต่ค่ากระแสเฉลี่ยในช่วงเวลา t_1 และ t_2 คือ $(I_{out}/2) / 2$ หรือ $I_{out}/4$ ดังนั้นเมื่อทำการอินทิเกรตสมการ จะได้ว่า

$$V = (I_{out}/4C_{out})(T/2) = (I_{out})T/8C_{out} = I_{out}/8fC_{out}$$

เมื่อ T คือ ช่วงเวลารวม t_1 และ t_2

เมื่อจัดรูปสมการเสียใหม่จะทำให้ได้ค่าตัวเก็บประจุขาออกต่ำสุด คือ

$$C_{out} = I_{out} / 8f\Delta V_{out} \tag{2.5.15}$$

เมื่อ $I_{out} = 0.25I_L$; I_L คือกระแสที่ไหลผ่านโหลด, ΔV_{out} คือ ค่าแรงดันกระเพื่อมที่ยอมรับได้, f คือ ความถี่ที่ใช้ในการทำงาน

หรือเพื่อที่จะให้แน่ใจได้ว่า แรงดันกระเพื่อมขาออกมีค่าตามที่ต้องการสามารถหาค่าความต้านทานแฝงของตัวเก็บประจุได้จาก

$$ESR_{max} = \Delta V_{out} / \Delta I_{out} \tag{2.5.16}$$

2.5.5 วงจรควบคุมการสวิตช์ให้คงที่ (Switching Regulator Control Circuit)

ข้อดีของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ คือ ส่วนที่เรียกว่า ส่วนขยายและลดความกว้างของสัญญาณ (Pulse-Width Modulated, PWM) ซึ่งสามารถที่จะเปลี่ยนช่วงเวลาการนำกระแสของทรานซิสเตอร์ ที่ใช้เป็นสวิตช์ปิด-เปิด ระหว่างช่วงเปิดเพื่อควบคุมและทำให้ศักย์ไฟฟ้าขาออกคงที่ๆ ค่าที่กำหนด ซึ่งถึงแม้ว่าอาจจะใช้วิธีอื่นในการควบคุมและทำให้ศักย์ไฟฟ้าขาออกคงที่ได้ แต่ PWM มีข้อดีในการทำงานมากกว่า เช่น ไม่ว่าจะเปลี่ยนตัวกันกระแสหรือโหลด (Load) ไปอย่างไร แหล่งจ่ายไฟก็ยังคงจ่ายกำลังให้ค่าคงที่เช่นเดิม หรือ การมีเสถียรภาพต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ปัจจุบันวงจรรวม (Integrated Circuit, IC) ได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างมากมาย ซึ่งจะบรรจุอุปกรณ์ หรือส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับใช้งานอยู่ภายใน โดยอาศัยอุปกรณ์ภายนอกเพียงเล็กน้อยในการการทำงานเท่านั้น และในโครงการพิเศษนี้ จะกล่าวถึงเฉพาะวงจรรวมที่ใช้ในการทำโครงการเท่านั้น

2.5.5.1 ระบบของตัวขยายและลดความกว้างของสัญญาณ

ระบบของตัวขยายและลดความกว้างของสัญญาณ เป็นการทำงานของตัวกำเนิดสัญญาณ

รูปคลื่นสี่เหลี่ยม เพื่อไปทำการขับทรานซิสเตอร์ ให้ทำงานแบบเป็นสวิทช์ไฟทำหน้าที่เปิดหรือปิด และสามารถควบคุม ระยะเวลาการเปิดหรือปิด หรือ ระยะเวลาการนำหรือไม่นำกระแสได้ โดยการปรับหรือยึดลูกคลื่นสัญญาณ ด้วยวิธีการนี้จะทำให้ได้ศักย์ไฟฟ้าขาออกของแหล่งจ่ายไฟเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

ตัว IC PWM มีหลายแบบอาจจะเป็นแบบช่องเดียว (Single-Ended) ที่ขับทรานซิสเตอร์ได้เพียงตัวเดียว ซึ่งใช้ในคอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็ค, ฟอ์เวิร์ด หรือ แบบสองช่อง (Dual-Chanel) ซึ่งใช้กับคอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ หรือ พุช-พูล

2.5.5.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบขยายและลดความกว้างของสัญญาณมีดังนี้

(ก) ตัวกำเนิดความถี่ เป็นตัวกำเนิดความถี่ขั้นมูลฐานให้กับแหล่งจ่ายไฟ และยังกำเนิดสัญญาณ RAMP สำหรับใช้ใน PWM

(ข) ตัวขับขาออก ที่ใช้ขับกระแสให้ได้ในขนาดที่ต้องการ เพื่อใช้ในงานที่มีกำลังต่ำปานกลาง

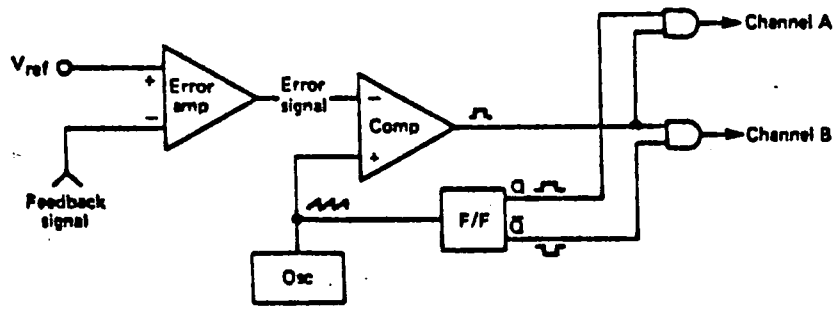
(ค) ค่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง เพื่อใช้เป็นตัวอ้างอิงกับสัญญาณภายนอกที่จะมาเปรียบเทียบ เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับหน้าที่อื่นๆ

(ง) ตัวขยายความผิดพลาดของศักย์ไฟฟ้า (A Voltage Error Amplifier) ซึ่งมีอัตราการขยายสูง โดยขยายความแตกต่างระหว่าง ศักย์ไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟกับค่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง

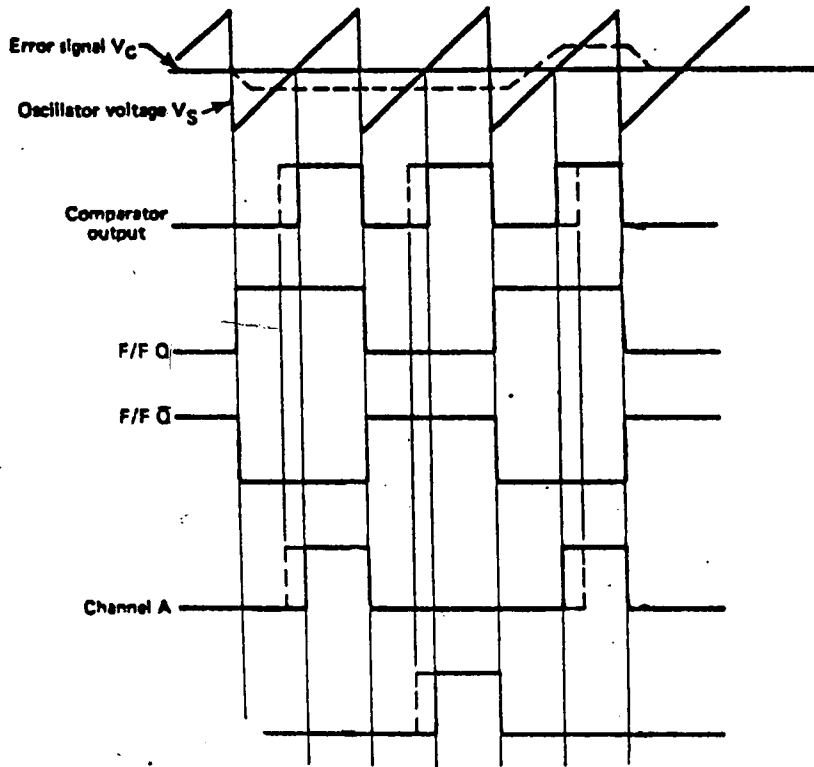
(จ) ตัวแปลงสัญญาณความผิดพลาดเพื่อไปปรับค่ารอบการทำงานให้ชัดเจน เพื่อให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปรียบเทียบไม่เกิดการผิดพลาด

จากรูปที่ 2.43 เป็นรูปการทำงานของระบบ PWM อย่างง่ายๆ โดยมีการทำงานดังนี้ ตัวออปแอมป์จะเปรียบเทียบ ค่าศักย์ไฟฟ้าป้อนกลับ ที่ได้มาจากแหล่งจ่ายไฟกับค่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง (V_{ref}) สัญญาณที่ผิดพลาด (Error Signal) หรือ สัญญาณที่แตกต่างกัน จะถูกขยายและส่งต่อไปหาอินเวอร์เตอร์ของตัวเปรียบเทียบ (Comparator) ส่วนที่ชานอนอินเวอร์เตอร์จะมีสัญญาณรูปฟันเลื่อยที่มีความชันเป็นเส้นตรง ที่ได้มาจากตัวกำเนิดความถี่สัญญาณ (Osc) (ซึ่งสัญญาณนี้จะนำไปผ่านตัวฟิลิฟลอป ได้สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมออกมาทางขา Q และ Q อีกทีหนึ่งด้วย) สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่ได้จาก ตัวเปรียบเทียบและฟิลิฟลอป จะนำไปขับแอนเดท (And Gate) ซึ่งจะได้สัญญาณออกมามีรูปคลื่นของทั้งสองเป็นแค็ทส์สูง ซึ่งผลก็คือ ได้สัญญาณออกมาโดยที่สามารถเปลี่ยนแปลงรอบการทำงานได้ ทั้งที่ช่อง A และ B

ส่วนรูป (ข) เป็นรูปแสดงสัญญาณต่างๆ



(a)



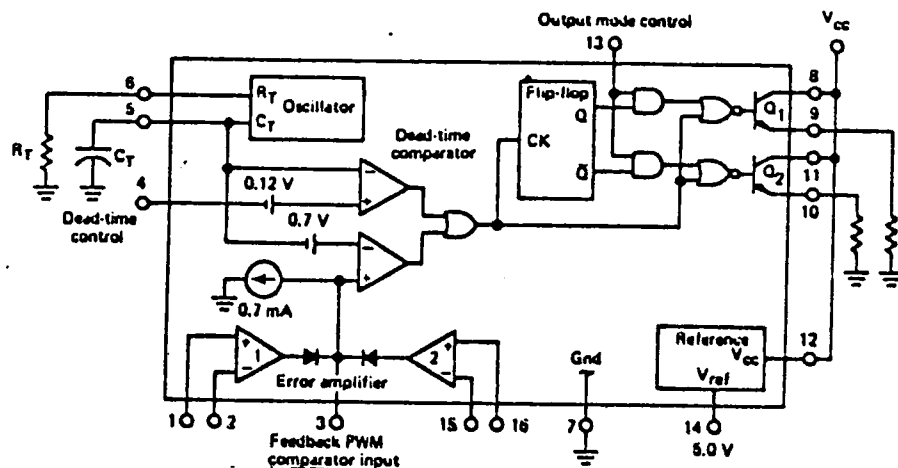
(b)

รูปที่ 2.43 a) รูปแสดงหลักการของ PWM b) รูปสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ ¹

2.5.5.3 TL494 PULSE WIDTH MODULATOR

ในโครงงานนี้เลือกใช้ ตัวขยายและหัดความกว้างของสัญญาณ ที่เป็นวงจรรวม เบอร์ TL494 ซึ่งรายละเอียดของวงจรจะอยู่ในภาคผนวก ในที่นี้จะอธิบายการทำงานของวงจรอย่างคร่าวๆ คือ TL494 เป็น IC PWM ชนิดความถี่คงที่ทำงานในแบบมีสัญญาณขาออก 2 ช่อง หรือ 1 ช่อง ก็ได้ รูปที่ 2.44 แสดงโครงสร้างภายในของ IC TL494 ตัวกำเนิดสัญญาณรูป

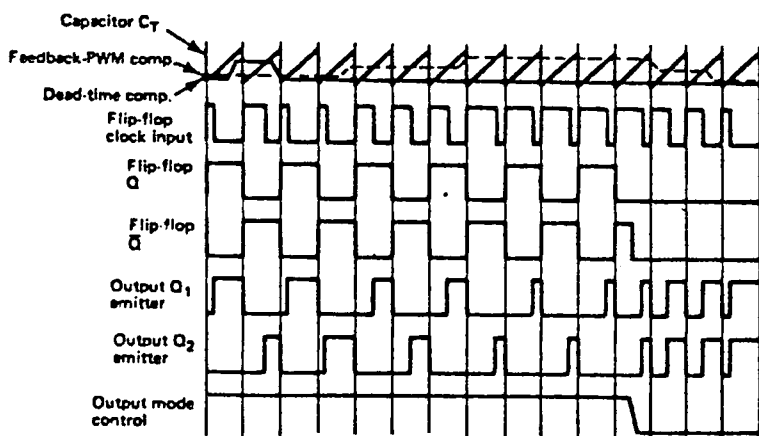
ฟันเลื่อยภายใน กำเนิดมาจาก R_T และ C_T ภายนอกที่ต่อกับขา 6 และ 5 ตามลำดับ โดยค่าความถี่คำนวณหาจาก



รูปที่ 2.44 รูปแสดงวงจรภายในของ IC TL494¹

$$f_{osc} = 1.1/R_T C_T$$

สัญญาณมอดดูเลขออก ได้มาจากการเปรียบเทียบ สัญญาณรูปฟันเลื่อยที่ออกมาจากขา C_T กับสัญญาณควบคุม นอร์เกต (Nor Gate) ซึ่งใช้ขั้วทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 จะทำงานก็ต่อเมื่อขาอินพุทของฟลิปฟล็อปมีสถานะ "0" เท่านั้น ซึ่งจะเกิดขึ้นเฉพาะช่วงเวลาที่สัญญาณฟันเลื่อยมี



รูปที่ 2.45 รูปคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ ของ IC TL494¹

ค่ามากกว่าสัญญาณควบคุม (Control Signal) ดังนั้นเมื่อเพิ่มขนาด (Amplitude) ของสัญญาณควบคุม ก็จะทำให้เกิดการลดลงเป็นเส้นตรงของความกว้างสัญญาณขาออก ดังแสดงในรูปที่ 2.45

สัญญาณควบคุม (Control Signal) เป็นสัญญาณที่ได้จากภายนอก โดยเข้ามาที่ขา Dead-Time Control ขา 4 ซึ่งมีตัวขยายสัญญาณผิดพลาด (Error Amplifier) มีขาเข้า 1, 2, 15 และ 16 หรือ 120 mV Offset Voltage ซึ่งจะจำกัด Dead Time ขาออกที่สุดให้อยู่ประมาณ 4% ของคาบเวลาของสัญญาณพื้นฐาน เป็นผลทำให้ได้รอบการทำงานสูงสุด 96% เมื่อต่อ Output Mode Control ขา 13 ลงดิน และจะมีค่า 48% เมื่อขาเดียวกันต่อกับค่าแรงดันอ้างอิง ค่า Dead Time อื่นๆ เพิ่มเติมจะทำได้ โดยต่อขา Dead-Time Control Input ขา 4 กับค่าศักย์คงที่ๆ มีค่าอยู่ในช่วง 0-3.3 V

การทำงานของตัวเปรียบเทียบ (Comparator) ของ PWM ที่ใช้ในตัวขยายสัญญาณผิดพลาด คือ จะทำการปรับความกว้างของรูปสัญญาณขาออกจากค่าสูงสุด (กว้างสุด) ซึ่งทำได้ โดยการนำขา Dead Time Control ลงดิน โดยอีกขาหนึ่ง ซึ่งเป็นขาป้อนกลับจะเปลี่ยนค่าได้ในช่วง 0.5 -3.5 V โดยตัวขยายความผิดพลาดทั้งคู่จะมี Common-Mode ขาเข้าในช่วง -0.3-(V_{cc}-2) V

สัญญาณขาออกของตัวขยายสัญญาณผิดพลาดจะแอดคัทที่ "1" และ นำไปเข้าออร์เกต (Or Gate) ร่วมกับสัญญาณที่ขานอนอินเวอร์เตอร์ของตัวเปรียบเทียบ เมื่อตัวเก็บประจุ C_T ถูกประจุ จะกำเนิดรูปสัญญาณที่เป็นบวกที่ส่วนขาออกของ Dead-Time Comptaror ซึ่งเป็นเสมือนตัวสัญญาณนาฬิกา (CK) ให้กับฟลิปฟล็อป ทำให้ได้สัญญาณขาออกที่ขา Q และ \bar{Q} ไปขับทรานซิสเตอร์ Q₁ และ Q₂ เมื่อนำขา Output Mode Control ขา 13 ต่อกับศักย์อ้างอิง สัญญาณที่ได้จากฟลิปฟล็อปแต่ละตัวจะออกมาสลับกัน ในทรานซิสเตอร์แต่ละตัว ซึ่งใช้ได้กับคอนเวอร์เตอร์แบบพูล โดยความถี่ที่ได้จะมีค่า เท่ากับครึ่งหนึ่งของความถี่ที่ได้จากตัวกำเนิดสัญญาณ

เมื่อใช้ PWM ในการทำงานแบบ 2 ช่อง และมีรอบการทำงานน้อยกว่า 50% ก็จะได้สัญญาณขาออกมาจากทรานซิสเตอร์ Q₁ และ Q₂ เมื่อต้องการค่ากระแสขาออกสูงขึ้นก็เพียงแต่นำทรานซิสเตอร์ Q₁ และ Q₂ มาขนานกัน ซึ่งก็จะทำงานในแบบ 1 ช่อง โดยขา OUTPUT MODE CONTROL ขา 13 จะต้องต่อลงดิน เพื่อทำให้ฟลิปฟล็อปไม่ทำงาน ความถี่ที่ได้ก็จะมีค่าเท่ากับ ความถี่ของตัวกำเนิดสัญญาณ

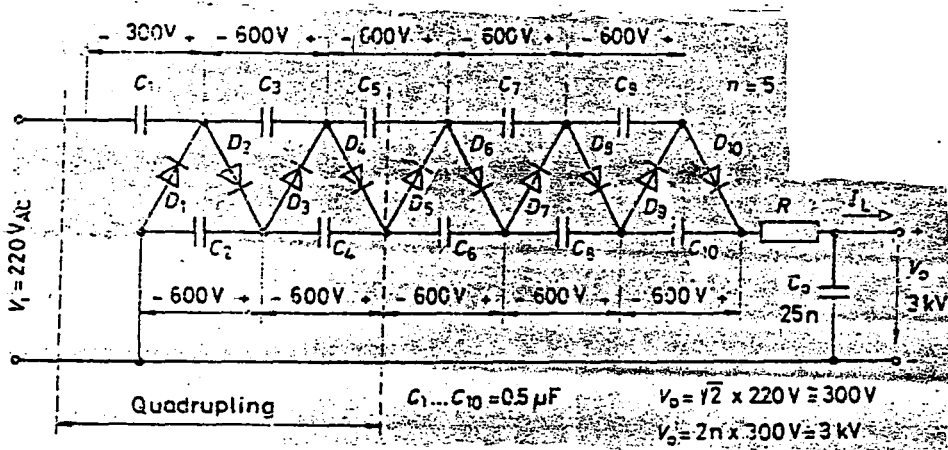
2.6 หลักการเบื้องต้นของวงจรทวีแรงดันแบบ DOUBLE VILLARD VOLTAGE QUADRUPLING CASCADE

การทวีแรงดัน (Voltage Multiplier Technique) เป็นวิธีการเพิ่มค่า

แรงดันจากค่าน้อย ๆ ให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยมีวิธีการใหญ่ ๆ อยู่ 3 วิธีคือ

- 1) การใช้หม้อแปลง (Transformer)
- 2) การใช้วงจรเรียงกระแส (Rectifier)
- 3) การใช้วงจรก้าทอนต่ออนุกรมกัน (Series Resonance Circuit)

ในโครงการพิเศษนี้ ใช้วงจรกิจักแรงดันแบบวงจรก้าทอนต่ออนุกรมกันวงจรกิจักแรงดันแบบที่ 3 คือ ใช้วงจรก้าทอนต่ออนุกรมกัน ซึ่งมีข้อเสียคือ ค่ากระแสที่ได้มีค่าน้อยมาก วงจรแบบนี้มีหลายชนิด เช่น แบบทวิตแรงดัน 2 เท่า (Voltage Doubler), 3 เท่า (Voltage Trebler) เป็นต้น โดยวงจรกิจักแรงดันแบบ Double Villard Voltage Quadrupling Cascade นี้เป็นวงจรกิจักแรงดันได้สูงมากไม่จำกัด มีรูปแบบวงจรเป็น



รูปที่ 2.46 แสดงวงจรกิจักแรงดันแบบ Double Villard¹
Voltage Quadrupling Cascade

ตัวเก็บประจุและไดโอดแต่ละตัว จะต้องทนแรงดันเพียงประมาณ 2 เท่าของไฟสลับ จึงทำให้ วงจรสามารถให้ค่าแรงดันที่สูงมากได้ โดยขนาดของแรงดันขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นของวงจร (Stage , n) ค่าแรงดันย้อนกลับสูงสุด ที่ไดโอดและตัวเก็บประจุจะต้องสามารถทนได้ หาได้จาก

$$V_r = 2\sqrt{2}V_{rms} \quad (2.6.1)$$

ส่วนค่าของตัวเก็บประจุนั้น จะขึ้นกับแรงดันกระแสเพิ่มที่สามารถยอมรับได้

$$V_{rpp} \approx I_L / f(1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \dots) \quad (2.6.2)$$

ค่ากระแสที่ไดโอดจะต้องทนได้นั้น ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านโหลด

$$\begin{aligned} I_{D1} &= nI_L; \\ I_{D2} &= (n-1)I_L; \\ I_{Dn} &= I_L \end{aligned} \quad (2.6.3)$$

บทที่ 3
การดำเนินการวิจัย

3.1 การวิจัยและการดำเนินการในส่วนของตัวอุปกรณ์ดักจับฝุ่น

ก่อนการวิจัยและการดำเนินการสร้างเครื่องต้นแบบ จำเป็นที่จะต้องกำหนดเป้าหมายหรือขอบเขตในการดำเนินการวิจัยเสียก่อน เพื่อที่จะมีผู้ทางหรือวิธีการที่แน่นอน เพื่อมิให้เกิดการสิ้นเปลืองเวลา หรือค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยโดยเปล่าประโยชน์โดยเมื่อกำหนดเป้าหมายแล้วก็ดำเนินการวิจัย เพื่อให้ถึงซึ่งเป้าหมายที่กำหนดไว้หากเมื่อเกิดเหตุขัดข้องก็ทำการศึกษาแก้ไขเพื่อให้บรรลุจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ หากแต่เมื่อไม่สามารถทำให้ตรงตามขอบเขตที่วางไว้ได้ก็อาจจะแก้ไขเป้าหมายได้ โดยต้องอยู่บนพื้นฐานของความเหมือนกัน ให้มากที่สุดของเป้าหมายเดิม

การดำเนินการวิจัยในโครงการพิเศษนี้ ก็ใช้วิธีการดังกล่าวข้างต้นในการทำการดำเนินการวิจัยเช่นกัน โดยแบ่งโครงการขึ้นออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของตัวอุปกรณ์ดักจับฝุ่น และส่วนแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง ดังจะได้กล่าวโดยละเอียดต่อไป

3.1.1 ขอบเขตในการดำเนินการสร้างส่วนตัวดักจับฝุ่น

การออกแบบเครื่องดักจับฝุ่นที่ใช้ในโครงการนี้ ใช้รูปแบบของเครื่องดักจับ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่เป็นต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 แต่ได้ย่อส่วนลงมา ให้เหมาะสมกับงบประมาณ และเวลาที่ใช้ในการดำเนินงาน โดยให้มีลักษณะเหลือแค่ 1 Chamber และ 1 Section เท่านั้น โดยมีสัดส่วนย่อลงมาให้เหมาะสมกับพื้นที่ๆ ใช้ในการทดลอง ส่วนประเภทและชนิดของเครื่องดักจับนั้น ก็ใช้ลักษณะที่เอื้อประโยชน์มากที่สุด โดยคำนึงถึงประเภทของฝุ่นเป็นสำคัญ เนื่องจากว่า ฝุ่นที่เป็นอยู่ในพื้นที่ที่ใช้ทดลองนั้น ไม่มีความหลากหลาย หรือเป็นลักษณะพิเศษแต่อย่างใด เพียงแต่มีขนาดที่แตกต่างกันเท่านั้น ฉะนั้นการพิจารณาประเภทและชนิดของเครื่องดักจับจึงเลือกชนิดที่ค่อนข้างจะง่าย และไม่สลับซับซ้อนมากนัก เพราะนอกจากจะพิจารณาด้านฝุ่นแล้วจะต้องคำนึงถึงปัจจัยทางด้านงบประมาณ และเวลาด้วย เช่น เลือกการทำงานที่อุณหภูมิห้องเพื่อการประหยัดพลังงานที่ใช้ เป็นต้น

ขอบเขตหรือขีดความสามารถของ เครื่องดักจับฝุ่น ที่จัดสร้างในโครงการพิเศษนี้ มีดังต่อไปนี้

- 1) เป็นเครื่องดักจับฝุ่นแบบ 2 ตอน (Two Sections)
- 2) มีการไหลของอากาศในแนวแกนตั้ง (Vertical Type)
- 3) ีวาล์วประจุเป็นเส้นลวดเรียบธรรมดา โดยใช้ลวดทองแดง s.p.g เบอร์ 27
- 4) ีวาล์วประจุเป็นชนิดแบบแผ่น เรียบแบน (Plate Type) ทำด้วย เหล็กอลูมิเนียม
- 5) เป็นชนิดที่ทำงานแบบแห้ง (Dry Type)
- 6) ทำงานที่อุณหภูมิห้อง (Cool Type)
- 7) ระบบระบายอากาศเป็นพัดลมชนิด พัดลมทางกระบอกโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2 แรงม้าของบริษัท Electromotorenwerk
- 8) การนำฝุ่นออกจากระบบใช้แรงในการสั่นสะเทือน โดยใช้ตัวสั่นสะเทือนแบบแม่เหล็ก (Magnetic Vibrator) ยี่ห้อ Syntron ของบริษัท FMC จำกัด
- 9) เหล็กที่ใช้ในการทำเป็นเหล็กแผ่นขึ้นรูป ทาสีกันสนิมสำหรับโครงภายนอก ส่วนเหล็กที่เป็นโครงภายในใช้เหล็กธรรมดา
- 10) แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงเป็นแบบสวิทช์ชิ่ง (Switching Power Supply) และใช้การทวีแรงดันเป็นส่วนช่วยเพิ่มค่าแรงดัน ให้แก่แหล่งจ่ายไฟ

3.1.2 การดำเนินการสร้างส่วนดักจับฝุ่น

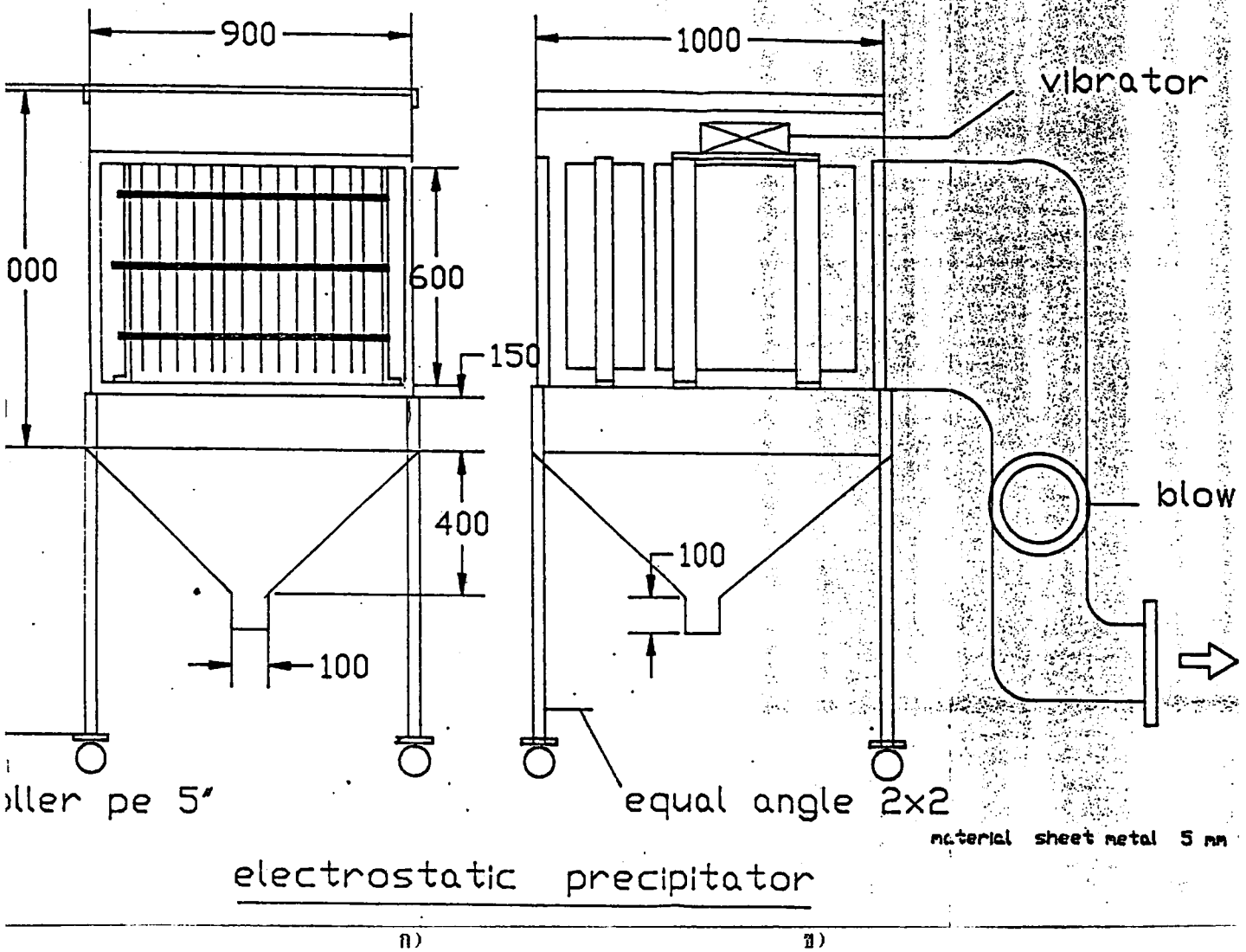
ดังได้กล่าวข้างต้นแล้วว่า รูปแบบของเครื่องดักจับ ที่ใช้ในโครงการนี้ ได้ทำการดัดแปลงมาจาก เครื่องที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม และได้ยืมวัสดุส่วนลงมาให้มีขนาดเหมาะสมกับเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ และงบประมาณที่ได้รับ

การสร้างเครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนที่เป็นห้องดักจับฝุ่น (Chamber) ซึ่งเป็นส่วนคล้ายกับ เป็นภาชนะปิดของระบบทั้งหมด ออกแบบให้สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยภายในจะบรรจุส่วนที่ 2 หรือส่วนที่เป็นตัวปล่อยไอออน และเป็นส่วนรวบรวมฝุ่นที่จับได้ (ซึ่งในขั้นตอนการกำหนดขอบเขตได้เลือกใช้ระบบที่เป็น 2 ตอน)

3.1.2.1 การดำเนินการสร้างหอรวบรวมฝุ่น (Chamber)

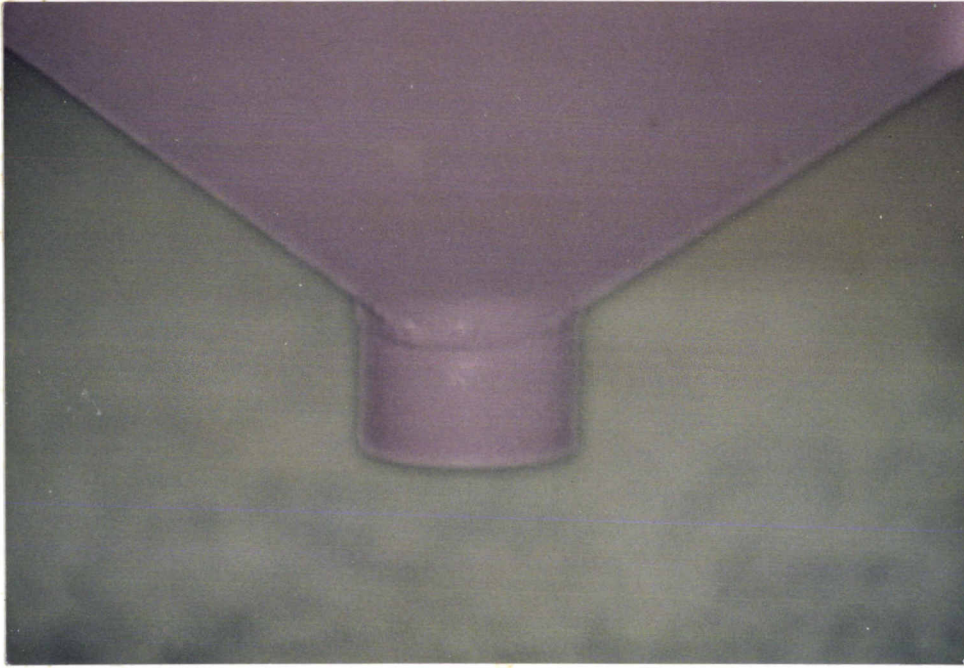
จากรูปที่ 3.1 รูป ก) แสดงรูปด้านหน้ารูป ข) แสดงรูปด้านข้าง โดยหอรวบรวมฝุ่นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนตอนบนและส่วนตอนล่าง โดยส่วนตอนบนมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีขนาด 1000x 1000x900 เซนติเมตร ทำการเจาะด้านหน้าและด้านหลังตรงกัน ขนาด 600x900 มม. ตำแหน่งสูงจากขอบด้านล่างของลูกบาศก์ 150 เซนติเมตร เพื่อเป็นช่องทางเดินของอากาศที่จะทำการจับ

แผ่น ส่วนด้านข้างปิด ภายในทำคานขนานสองอัน ทอดตามแนวด้านหน้าสู่ด้านหลัง ที่ตำแหน่งสูงจาก ด้านขอบด้านล่างของลูกบาศก์ 150 เซนติเมตรเช่นกัน เพื่อวางส่วนจับแผ่นที่จะกล่าวต่อไปภายหลัง



รูปที่ 3.1 แสดงงานเขียนแบบ และอัตราส่วนของหอรวบรวมฝุ่น ในหน่วยเซนติเมตร

ส่วนส่วนล่างนั้น ทำเป็นลักษณะคล้ายรูปปิระมิดสี่ด้าน สอดเข้าหากันสี่พื้น แต่ที่ปลายยอดนั้น ทำเป็น ทรงกระบอกต่อออกมาจากยอดปิระมิด โดยส่วนปิระมิดนี้มีความสูง 400 เซนติเมตร และทรงกระบอกตรงยอดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และมีความยาว 10 เซนติเมตร ส่วนที่สองนี้ มีไว้เพื่อเป็นทางออกของฝุ่นที่จับได้จากส่วนบน ที่ต้องทำเป็นความชันสี่ด้านสอดเข้าหากัน ก็เพื่อที่จะ แรงให้ฝุ่นตกลงสู่หม้อเก็บฝุ่นเร็วขึ้น นอกจากที่จะอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกเพียงอย่างเดียว โดย หม้อเก็บฝุ่นนั้น จะใช้เป็นลักษณะถุง สวมเข้ากับทรงกระบอกที่ปลาย เพื่อความง่ายต่อการนำไปทำ



รูปที่ 3.2 แสดงหม้อเก็บฝุ่น

จัดต่อไป โดยส่วนบนกับส่วนล่างนั้น เป็นส่วนที่ต่อถึงกันโดยตลอด ที่ตำแหน่ง 850 เซนติเมตรจาก ด้านบนลงมา ทำเป็นขาที่มุมทั้ง 4 ด้านลงมา ความยาว 950 เซนติเมตร ติดล้อที่ขาทั้ง 4 ด้าน เพื่อใช้ในการเคลื่อนย้าย โดยล้อทั้ง 4 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว

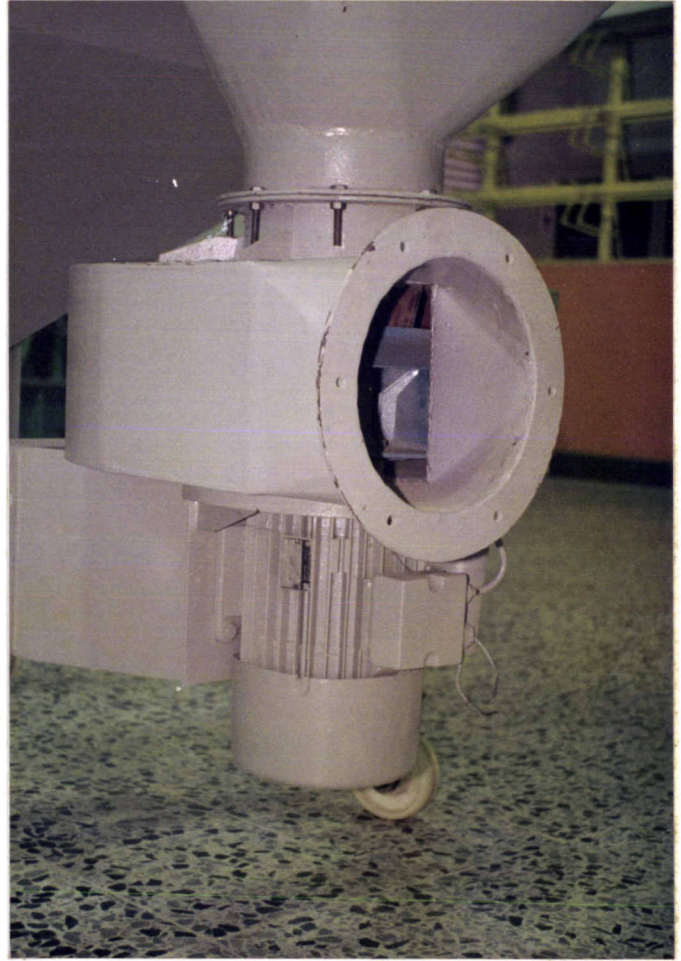
ส่วนด้านข้างจากรูป ข) นั้น จะต่อท่อทางเดินอากาศเป็นลักษณะเป็นท่อ ต่อลงไปด้านล่าง ต่อกับพัดลมดูดอากาศ (Blower) และทำการพ่นอากาศออกทางด้านท้ายสุดของด้านล่างโดย ส่วนที่ติดกับด้านหลังของลูกบาศก์นั้นจะเป็นส่วนปิดทั้งหมด แล้วบีบเข้ามาเป็นท่อทางเดินของอากาศ โดยมีพัดลมต่อขึ้นอยู่ พัดลมที่ใช้ก็เป็นพัดลมแรงเหวี่ยง คือ ดูดอากาศเข้าทางด้านหนึ่งแล้วพ่น ออกทางอีกด้านหนึ่ง ลมที่ดูดเข้ามานี้ ก็จะผ่านบริเวณใจกลางของทรงลูกบาศก์ด้วย ซึ่งจะเป็นส่วน ที่จะทำการจับฝุ่น ซึ่งอยู่ในหัวข้อ 3.1.2.2



ก) รูปด้านหน้า

ข) รูปด้านข้าง

รูปที่ 3.3 หอรวบรวมฝุ่น (Chamber) ที่ได้ทำการสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว



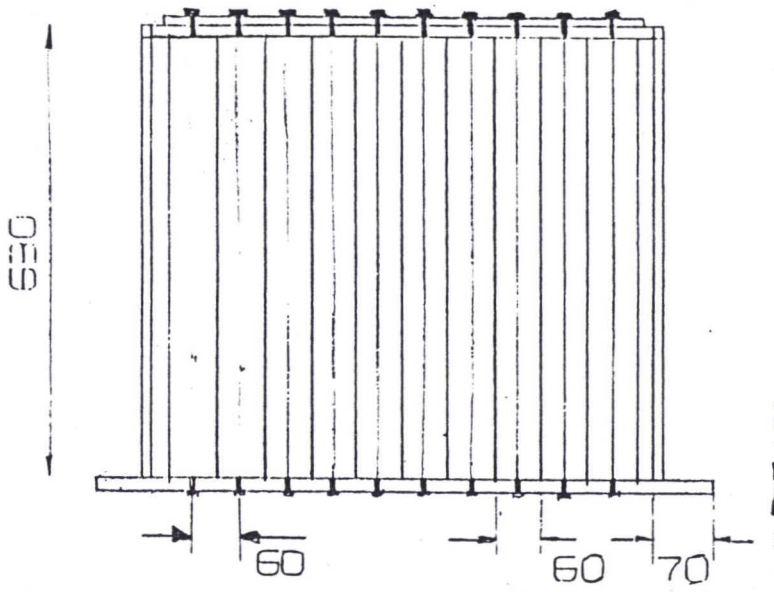
ก) ท่อทางเดินอากาศ

ข) ระบบระบายอากาศ

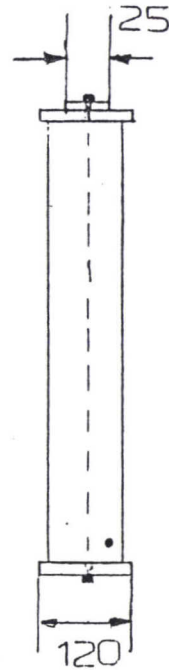
รูปที่ 3.4 ส่วนท่อทางเดินอากาศ และระบบระบายอากาศ

3.1.2.2 การดำเนินการสร้างส่วนรวบรวมฝุ่น

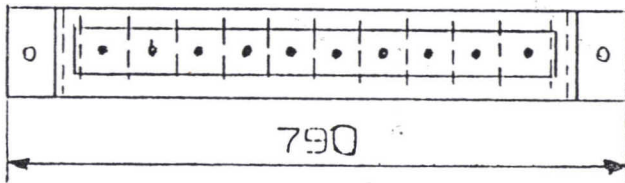
ได้กล่าวแล้วว่า รูปแบบของเครื่องดักจับฝุ่น ที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้เป็นแบบสองตอน (2 Sections) ในตอนแรกจะเป็นส่วนปล่อยประจุ ส่วนในตอนที่สองจะเป็นส่วนที่ใช้สำหรับรวบรวมฝุ่น ซึ่งจะต้องมีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ เพื่อที่จะเพิ่มพื้นที่ในการจับฝุ่นให้มากที่สุด ในส่วนแรกนั้น จะใช้ลวดทองแดง S.W.G. เบอร์ 27 เป็นขั้วปล่อยประจุ ส่วนขั้วดินหรือรับประจุใช้แผ่นเหล็กอลูมิเนียม ขนาด 610x660 เซนติเมตร วางอยู่ระหว่างเส้นขั้วปล่อยประจุ ดังรูปที่ 3.5



ก) ด้านหน้า



ค) ด้านข้าง

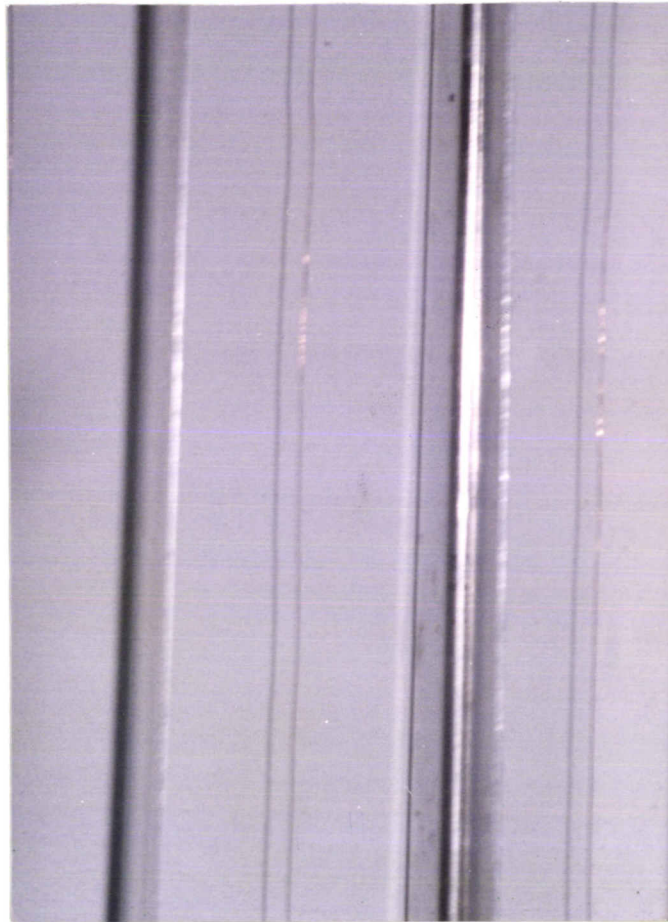


ข) ด้านบน

รูปที่ 3.5 แสดงงานเขียนแบบ ส่วนปล่องประจุส่วนที่ 1

โดยมีที่ยึด เป็นแผ่นยางแข็งหนา 1 เซนติเมตร กว้าง 12 เซนติเมตร และยาว 70 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดพอดีกับความกว้างของหน้าตัดที่เจาะ ที่ห่อรวบรวมฝุ่น โดยแผ่นยางทั้งสองที่มุมทั้งสองจะมีแท่งเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ครึ่งเซนติเมตร ค้ำอยู่ที่ 4 มุมยึดด้านบนและด้านล่างให้เป็นโครงและที่แผ่นยางเจาะร่องเป็นช่องยาว 10.5 เซนติเมตร เพื่อที่จะใส่แผ่นซีวรวบรวมประจุ ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 11 แผ่น มีระยะห่างระหว่างแผ่น 6 เซนติเมตร และห่างจากขอบของแผ่นยาง 4.5 เซนติเมตร การใส่ซีวไฟฟ้าให้กับซีวรับประจุ จะใช้การเจาะแผ่นรับประจุให้เป็นรูที่ตำแหน่งเดียวกันหมดทุกแผ่น เพื่อที่จะสอดเหล็กแท่งให้ผ่านไปได้ทุกแผ่น และเมื่อแท่งเหล็กผ่านแผ่น

รับประจุแต่ละแผ่นก็ให้หลอดตัวเมย์ พร้อมทั้งแหวนยึดให้ไม่เคลื่อนที่และให้สัมพันธ์กับแผ่นในขณะเดียวกัน การใส่ขั้วก็ใส่ที่แท่งลวดตรงปลายที่ยื่นออกมา พื่นออกจากขั้วรับประจุทั้งสองด้าน

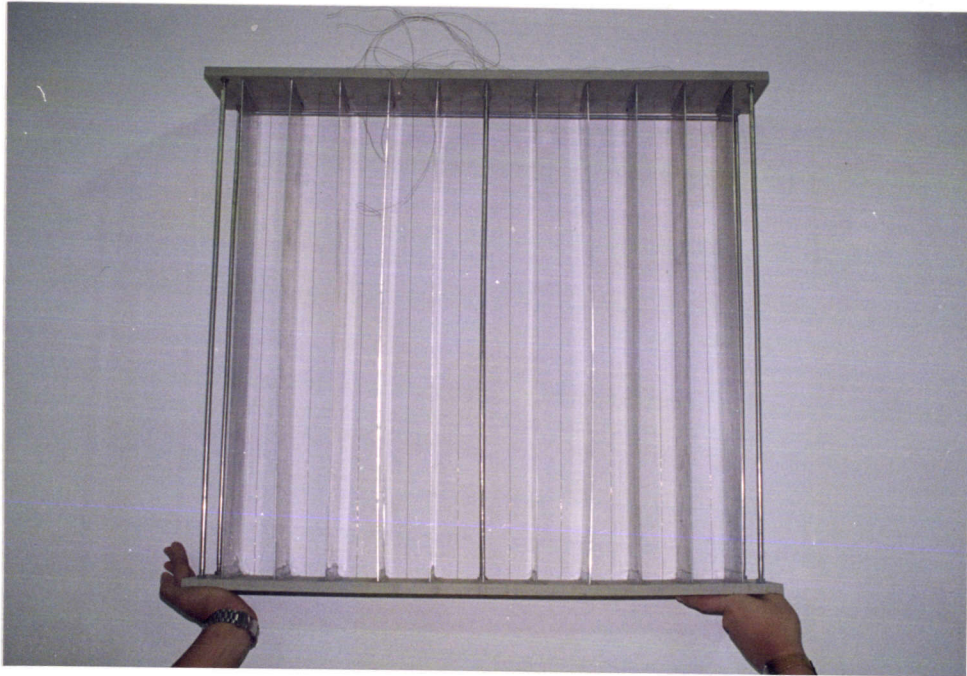


รูปที่ 3.6 แสดงเส้นลวดปล่อยประจุและแผ่นรับประจุบริเวณส่วนหน้า

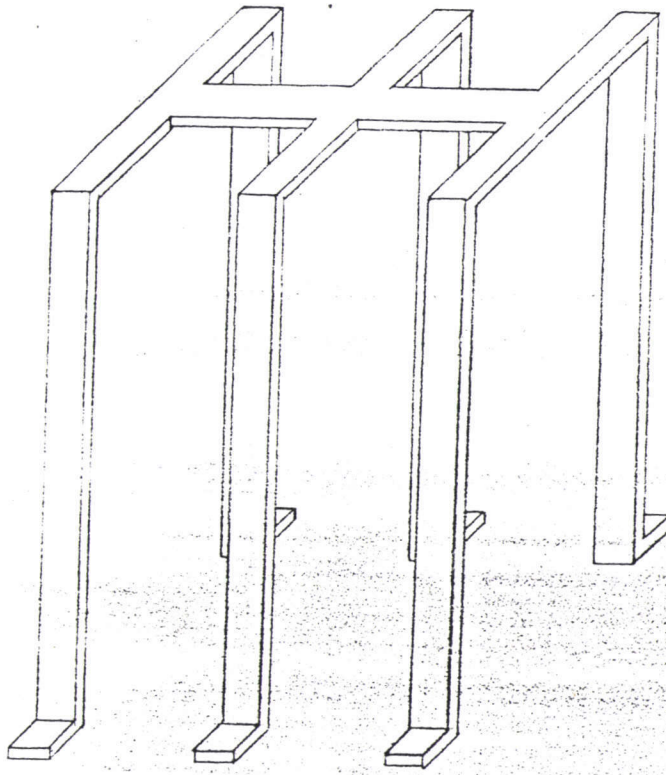
ที่กึ่งกลางระหว่าง 2 แผ่น ทำการเจาะรูที่แผ่นยางแข็งทั้งทางด้านบน และด้านล่าง ให้ตรงกันพอดี แล้วทำการร้อยลวด ซึ่งให้ตั้งตัดปลายด้านล่างให้พอดีกับแผ่นยาง ส่วนด้านบนปล่อยให้ยาวออกมาเพื่อจะได้เป็นที่ใส่ขั้วไฟฟ้า การยึดใช้ตะกั่วละลายลงไปปิดรูซึ่งให้ตั้ง

การสร้างส่วนเก็บฝุ่นส่วนที่ 2 นั้น ใช้ลักษณะเดียวกับกับส่วนหน้า

ส่วนการดำเนินการสร้างส่วนที่ 2 นั้นจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันกับส่วนหน้า แต่มีส่วนที่แตกต่างกันในส่วนของขั้ว คือในส่วนที่ 2 นี้จะไม่มีขั้วปล่อยประจุ จะมีเพียงขั้วรับประจุเพียงอย่างเดียวแต่ก็จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันเช่นเดิม ในส่วนที่สองนี้จะมีขนาดใหญ่กว่าส่วนแรกมาก โดยจะใช้โครงเหล็กเป็นตัวจับแผ่นจับฝุ่นทั้งหมดไว้ด้วยกัน โดยที่แผ่นจับฝุ่นแต่ละแผ่นจะเจาะรูไว้ 9 รู แล้วร้อยแท่งเหล็กผ่านทั้ง 9 รู โดยปลายทั้งสองด้านจะถูกพองด้วยโครงเหล็กดัดงอไว้ ซึ่งจะเจาะรูไว้ 9 รู ที่แต่ละข้างเช่นกัน ลักษณะของโครงเหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.8

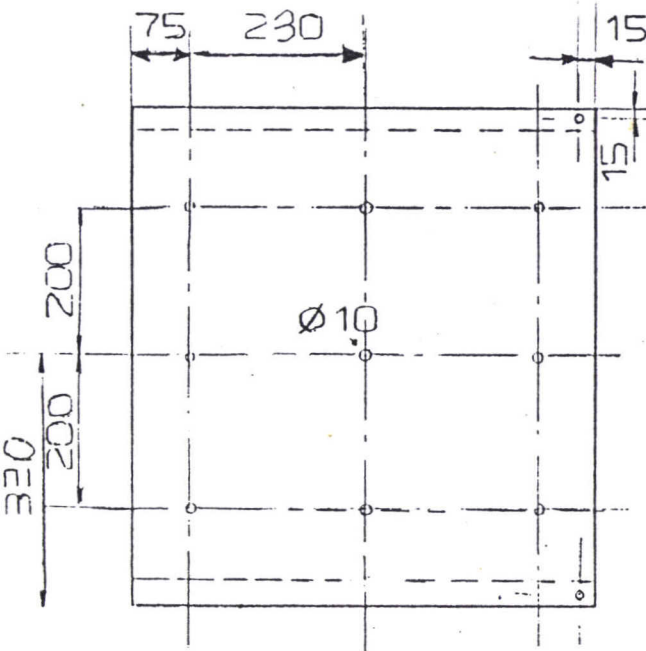


รูปที่ 3.7 ส่วนปล่อยประจุ(ส่วนที่ 1) เมื่อทำการสร้างเสร็จแล้ว

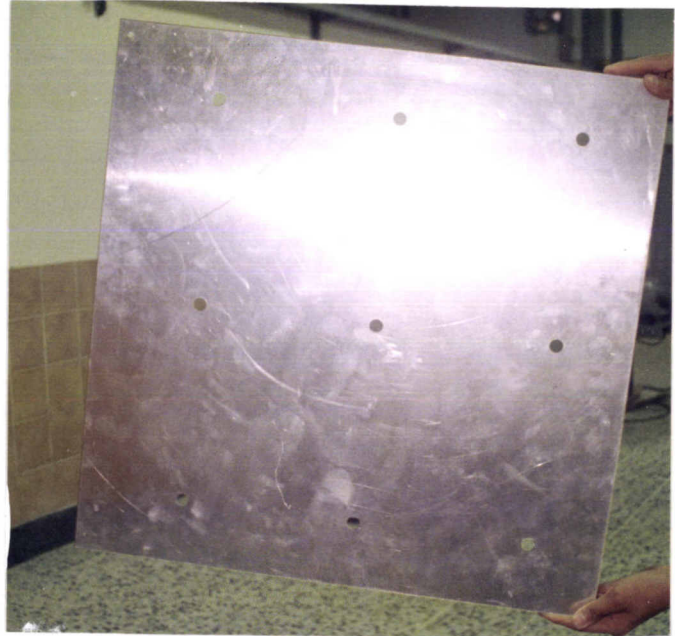


รูปที่ 3.8 แสดงงานเขียนแบบของโครงเหล็กที่ใช้ในส่วนที่สอง

จากรูป่าะมีลักษณะคล้ายเหล็กแท่ง 3 ขนาดกว้าง 2 นิ้วหนา 1 เซนติเมตรยาว 250 เซนติเมตรตามลำดับ สามเส้นขนานกัน โดยด้านบนมีเหล็กเชื่อมให้เป็นโครง หักให้เป็นสี่เหลี่ยมตามขนาดของแผ่นจับฝุ่น โดยมีขาขึ้นออกมาตรงปลายเพื่อที่จะติดตั้งเข้าไปในท่อเก็บฝุ่น ที่ตรงคานทั้งสอง ส่วนด้านบนเป็นที่ติดอุปกรณ์สิ้นสะเกือน ให้ฝุ่นหลุดออกมาจากแผ่นจับฝุ่น ซึ่งชั้นนี้ติดกับโครงเหล็กชั้นนี้ ทางด้านบน แผ่นจับฝุ่นที่จะประกอบเข้าไปในโครงเหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.9



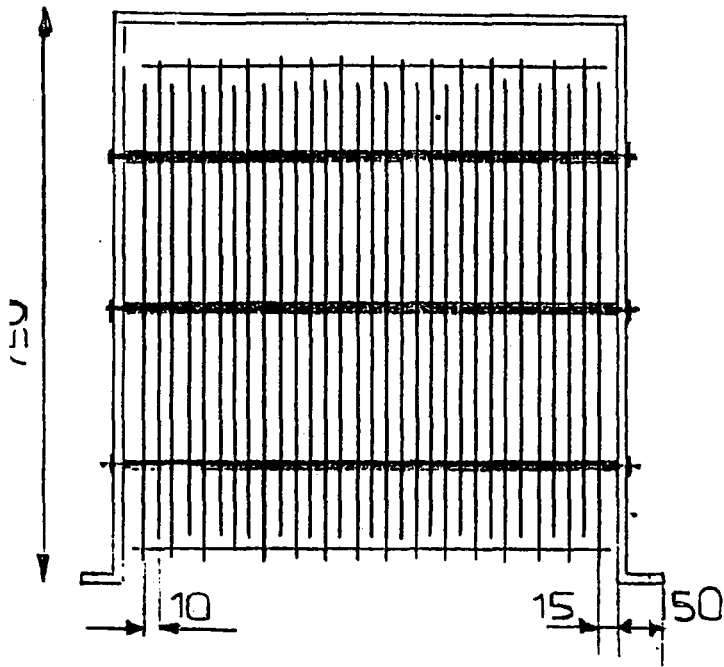
ก) งานเขียนแบบ



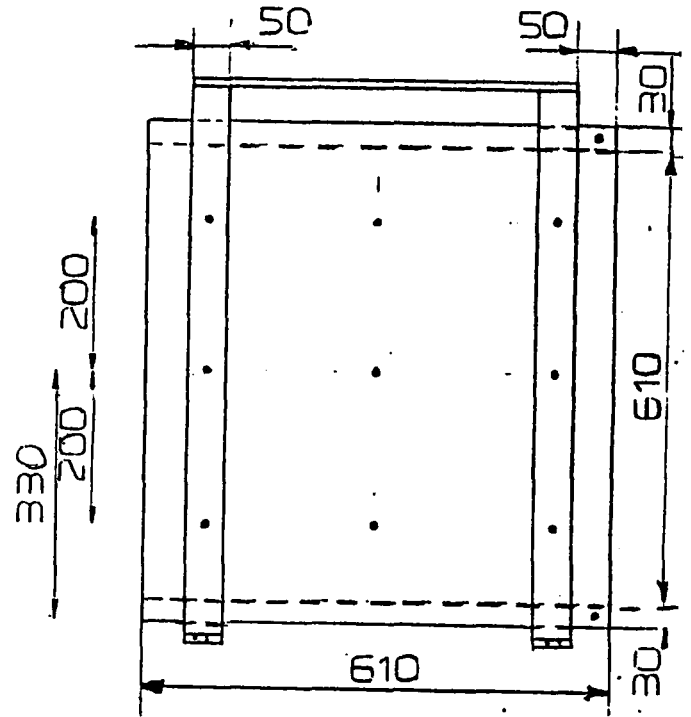
ข) แผ่นที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 3.9 แผ่นจับฝุ่นที่ใช้ในส่วนที่ 2

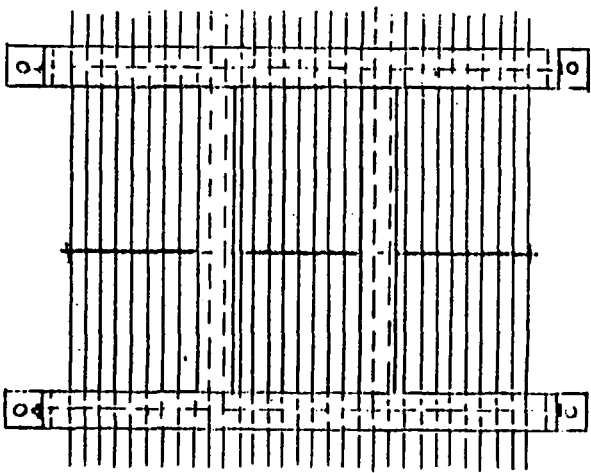
ใช้แผ่นอะลูมิเนียม ขนาด 610x660 เซนติเมตร ซึ่งเจาะรู 9 รู ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของด้านยาว เจาะรูขนาด 10 มิลลิเมตร โดยห่างจากด้านยาว 75 เซนติเมตร 1 รู และอีก 2 รู ที่ตำแหน่งกึ่งกลางเช่นเดียวกันแต่มีระยะห่างจากรูแรก 230 และ 460 เซนติเมตร หลังจากนั้นเจาะด้านซ้ายและด้านขวาด้านละ 3 รู โดยขนานกับรูแถวกลางเป็นระยะ 200 เซนติเมตร ซึ่งเราจะแบ่งแผ่นออกเป็น 2 ชุด ให้เอียงกันออกมาด้านใดด้านหนึ่ง 15 เซนติเมตรดังรูป แล้วทำการเจาะรูที่มุมแผ่นอีก 1 รู ทำสลับกันไปเรื่อย ๆ จนครบ 60 แผ่น จะเห็นว่าเมื่อนำไปติดตั้งแล้วก็ได้แผ่นจับฝุ่น 2 พวก สลับกันไปมา ดังรูปที่ 3.10 ก) เส้นเล็กๆ ด้านบนและล่างก็คือรู 1 รูที่เจาะตรงมุมของแผ่นทั้ง 2 พวก ซึ่งเป็นที่ใส่แท่งเหล็ก ที่ใช้เป็นขั้วให้ศัลยไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ด้วยวิธีนี้จะทำให้สามารถแยกแผ่น 2 แบบ สลับกันไปมาตามแต่ละขั้วได้ แต่ต้องมีอุปกรณ์พิเศษเป็นท่อพลาสติกขนาดสั้น เพื่อใช้ร้อยผ่านแท่งเหล็ก เพื่อแยกแผ่นจับฝุ่นแต่ละแบบไม่ให้ติดกัน โดยจะมีท่อพลาสติกอยู่ 3 แบบดังแสดงในรูปที่ 3.11



ด้านหน้า
ก)

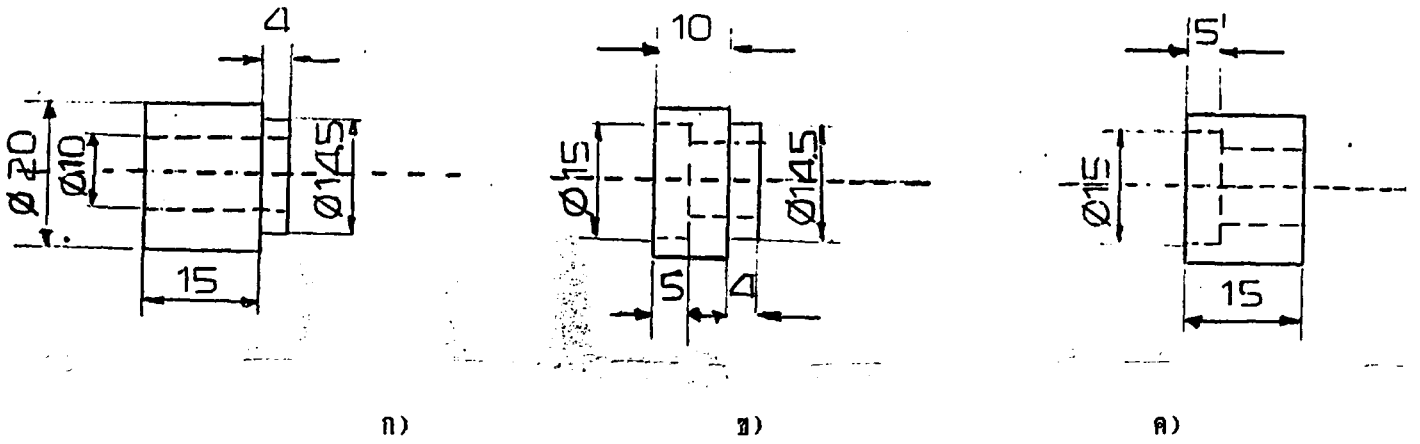


ด้านข้าง
ข)



ด้านบน
ค)

รูปที่ 3.10 แสดงงานเขียนแบบ เมื่อทำการประกอบแผ่นจับปูนเข้ากับโครงเหล็กแล้ว



รูปที่ 3.11 แสดงงานเขียนแบบของอุปกรณ์ที่ใช้แยกแผ่นจับฝุ่นแต่ละประเภท

ลักษณะของท่อพลาสติกขนาดเล็กนี้ จะมี 2 ส่วน คือส่วนที่มีขนาดใหญ่กว่ารูที่เจาะที่แผ่นจับฝุ่น และส่วนที่มีขนาดเล็กกว่ารูที่เจาะที่แผ่นจับฝุ่น เพื่อที่จะสอดผ่านแผ่นจับฝุ่นได้ โดยแต่ละตัวจะสามารถเชื่อมต่อกันได้พอดี ทำให้มีลักษณะคล้ายท่อขนาดเล็ก วิธีการนี้ก็จะมีส่วนที่ไม่สามารถจะผ่านรูที่เจาะที่แผ่นจับฝุ่นได้ (ส่วนที่ 1 ตามรูป 3.11 ก) กับส่วนที่เข้าไปพอดี (ส่วนที่ 2 ตามรูป 3.11 ข) และส่วนที่ 1 ของตัวถัดไปก็จะสามารถสวมเข้ากับส่วนที่ 2 ได้พอดีเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนหมดแผ่นจับฝุ่น โดยรูปที่ 3.11 ก) และ ค) จะเป็นตัวที่เริ่มใส่เข้าไปเป็นตัวแรก และตัวสุดท้ายตามลำดับ ซึ่งจะมีขนาดใหญ่กว่าตัวปกติ เพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรง โดยตัวที่อยู่ในรูป ก) นั้นจะมีเฉพาะส่วนที่ยื่นออกมา เพื่อให้สอดผ่านแผ่นจับฝุ่น และตัวที่อยู่ในรูป ข)สวมต่อผ่านไป ได้พอดีเรื่อยไปจนกระทั่งตัวสุดท้ายในรูป ค) ก็จะมีเฉพาะร่องสำหรับให้ส่วนที่ 2 ของรูป ข)สวมเข้าไปได้พอดี ทั้งตัวแรกและตัวสุดท้ายก็จะไปถึงโครงเหล็ก ที่ช่วยพยุงแผ่นจับฝุ่นไว้ทั้งหมดพอดี เมื่อใส่แผ่นจนหมด ก็ทำการใช้น็อตตัวเมียปิดหัวท้ายแท่งเหล็กที่ยื่นออกมาจากโครงเหล็ก ซึ่งจะทำให้ได้ระบบที่สมบูรณ์เรียบร้อยดังแสดงในรูปที่ 3.13

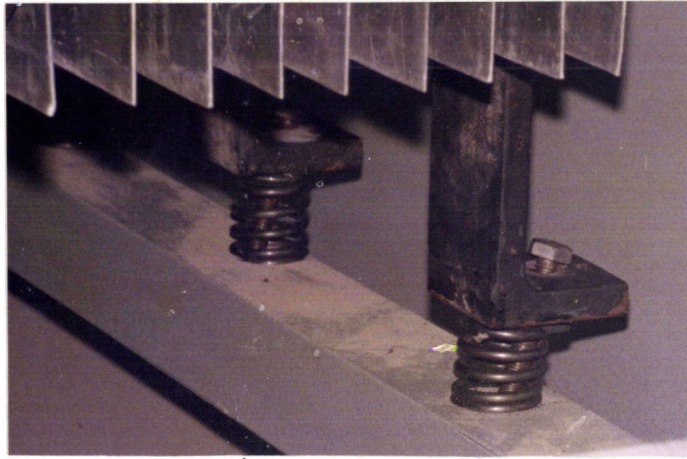
เมื่อทำการประกอบชุดจับฝุ่นในส่วนที่ 2 เรียบร้อยแล้ว จึงนำส่วนนี้ เข้าไปติดตั้งในหอรวบรวมฝุ่น โดยการติดตั้งจะวางไว้บนคาน 2 เส้นที่กล่าวในหัวข้อ 3.1.2.1 แล้วโดยลักษณะของโครงเหล็กดังที่กล่าวแล้วว่า ที่ขาทั้ง 6 ด้านที่ทำเป็นหม้อมุมไว้เป็นตัวตั้งของโครงเหล็กนั้น จะทำการเจาะรูไว้ ซึ่งตำแหน่งทั้ง 6 ก็ได้ทำการเจาะบนคาน ณ.จุดเดียวกัน เมื่อทำการใส่ส่วนนี้ลงไปก็จะทำให้พอดีกับตำแหน่งรูทั้งหมด ซึ่งจริง ๆ แล้วจะทำการขันน็อตยึดติดเลย แต่เนื่องจากว่า จำต้องใช้อุปกรณ์ในการขันชุดที่ 2 นี้ เพื่อให้ฝุ่นหลุดลงมา การที่จะใส่น็อตธรรมดา เมื่อทำการเปิดอุปกรณ์ขึ้นแล้วจะทำให้เกิดการสั่น และส่งแรงไปยังคาน ซึ่งชุดจับฝุ่นค่อนข้างจะมีน้ำหนักมาก อาจจะทำให้เกิดการหักได้ ฉะนั้นตรงรอยต่อระหว่างชุดจับฝุ่นกับคานจะใส่สปริงไว้ เพื่อเป็นการ



รูปที่ 3.12 แสดงระบบให้แรงสั่นสะเทือน

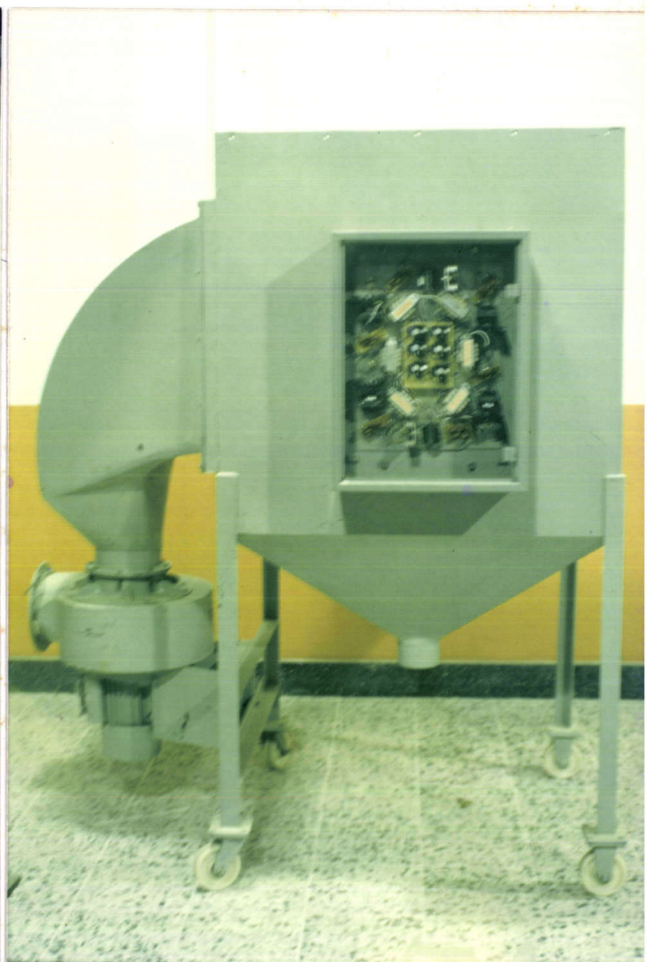


รูปที่ 3.13 ชุดค้ำจับฝุ่น(ส่วนที่ 2) เมื่อประกอบเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.14 สปริงพ่อนแรง

ถ้าแรงออกไปแล้วใช้น็อตที่มีขนาดยาวขึ้น สอดผ่านสปริงแทนด้วยวิธีนี้จะทำให้ลดความเสียหายได้
 เมื่อทำการประกอบชุดทั้งหมดเข้าด้วยกัน ก็จะได้ เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ ที่
 สมบูรณ์ ซึ่งก็เหลือส่วนแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงที่จะต้องให้กับระบบ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



ก) เมื่อประกอบส่วนดักจับฝุ่นเข้ากับหอรวบรวมฝุ่น ข) เมื่อประกอบแหล่งจ่ายไฟเข้ากับระบบ

รูปที่ 3.15 รูปแสดงเมื่อประกอบส่วนต่างๆ เข้ากับระบบ

3.2 การวิจัยและการดำเนินการในส่วนของแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง

การดำเนินการสร้างแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง ได้พิจารณาจากหลาย ๆ ระบบแล้วนำมาเปรียบเทียบหาข้อดีข้อด้อยของแต่ละแบบ ได้ผลสรุปดังต่อไปนี้

ตาราง 3.1 แสดงการเปรียบเทียบชนิดของแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงชนิดต่าง ๆ

ประเภทของแหล่งจ่ายไฟ	ประสิทธิภาพ	ความซับซ้อน	ขนาดแรงดันที่ได้	ขนาดอุปกรณ์	ชนิดของอุปกรณ์
สวิตซ์ชิ่ง	70-80%	มาก	มาก	เล็ก	ชนิดพิเศษ
เชิงเส้น	30-40%	ปานกลาง	น้อย	ใหญ่	ปกติ
ทวิแรงดัน	10-20%	น้อย	มากที่สุด	ปานกลาง	ปกติ

เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ชิ่งผสมกับการทวิแรงดันจะเหมาะสมที่สุด

3.2.1 ขอบเขตในการดำเนินการสร้างแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง

ขอบเขตหรือขีดความสามารถของแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง ที่จัดสร้างในโครงการพิเศษนี้ มีดังต่อไปนี้

- 1) ใช้แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ชิ่ง (Switching Power Supply) เนื่องจากเป็นแหล่งจ่ายไฟที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 60-80% มากกว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าเชิงเส้นปกติ ที่มีประสิทธิภาพเพียง 30-40% รวมทั้งเมื่อเทียบที่กำลังงานเท่ากัน แหล่งจ่ายไฟเชิงเส้น ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสร้างมากกว่า และมีอันตรายมากกว่าอีกด้วย
- 2) ในตอนที่ 1 ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าประมาณ 12 กิโลโวลต์ เนื่องจากเป็นส่วนที่ทำให้เกิดประจุ จึงต้องใช้ค่าแรงดันสูงกว่าในตอนที่ 2 ซึ่งใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าประมาณ 7 กิโลโวลต์ เพราะเป็นส่วนรวบรวมฝุ่น โดยไม่ต้องทำให้อากาศแตกตัว เพียงแต่ทำให้ฝุ่นมาเกาะติดเท่านั้น

- 3) ค่ากระแสที่ใช้ จะมีค่าประมาณ 100 ไมโครแอมป์ เนื่องจากยิ่งค่ากระแสมาก ก็ยิ่งทำให้มีอันตรายสูง (แต่ถ้าฟุ่่นมากมีปริมาณมาก ค่ากระแสที่ไหลครบวงจรก็จะยิ่งมากขึ้น ซึ่งเป็นข้อเสียของโครงการพิเศษชิ้นนี้)
- 4) ในส่วนสวิตช์ซึ่งนั้นมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้
 - 4.1 ใช้คอนเวอเตอร์แบบฟลายแบ็ค เนื่องจากไม่มีความซับซ้อนมากนัก และได้กำลังขาออกเพียงพอที่จะใช้กับระบบนี้ได้
 - 4.2 ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ มีค่าประมาณ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ทำให้หาอุปกรณ์ที่ตอบสนองต่อความถี่ขนาดนี้ได้ง่าย และมีราคาไม่สูงนัก
 - 4.3 แรงดันขาเข้ามีค่า 24 โวลต์ ค่ากระแสประมาณ 1 แอมป์ ซึ่งเหมาะสมกับกำลังที่ตัวทรานซิสเตอร์กำลังจะทนได้ โดยไม่มีความร้อนเกิดขึ้นมากนัก ส่วนแรงดันขาออกนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องแบ่งแรงดันออกเป็นค่าต่ำ ๆ เนื่องจากที่แรงดันค่าสูง ๆ จะทำให้เกิดการสปาร์คในหม้อแปลงความถี่สูงได้ โดยจะแบ่งออกเป็นแรงดันหม้อแปลงลูกละ 2 ถึง 4 กิโลโวลต์โดยประมาณ แล้วนำมาอนุกรมกันอีกทีหนึ่ง เพื่อให้ได้แรงดันตามที่ต้องการอีกทีหนึ่ง
 - 4.4 วงจรคงค่าแรงดันให้คงที่ (Regulator) ใช้การทำงานแบบปรับแรงดันให้คงที่ คือใช้แรงดันป้อนกลับ มาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง เพื่อปรับความถี่ในการทำงานเพื่อให้คงค่าแรงดันที่ต้องการไว้ได้ ที่ไม่เลือกใช้ค่ากระแส เนื่องจากในเครื่องดักจับฟุ่่นนี้ให้ความสำคัญกับค่าแรงดันสูง เพราะเป็นหัวใจในการทำงานของเครื่อง ไม่ใช่ค่ากระแส แต่ค่ากระแสจะแปรไปตามปริมาณฟุ่่นมากกว่า
- 5) นอกจากแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ซึ่งแล้ว ในโครงการพิเศษนี้ได้ใช้วงจรทวีแรงดัน เพื่อเพิ่มค่าแรงดันให้มีค่าสูงขึ้นอีก เพิ่มขึ้นจากที่ทำได้ เมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบสวิตช์ซึ่ง เพียงอย่างเดียว เนื่องจากว่า เมื่อนำแหล่งจ่ายไฟที่เป็นสวิตช์ซึ่งเพียงอย่างเดียว ไปต่อเข้ากับส่วนปล่อยประจุ และส่วนจับฟุ่่นแล้วทำให้เกิดแรงดันตก (Voltage Drop) ลงค่อนข้างมาก

3.2.2 การดำเนินการสร้างแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง

แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงที่ใช้ในโครงการนี้ ดังได้กล่าวแล้วว่า เป็นแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ซึ่ง ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกัน คือ ส่วนขาเข้า, ส่วนคอนเวอเตอร์, ส่วนขาออกส่วน PWM (ซึ่งทำหน้าที่กำเนิดความถี่ และคงค่าแรงดันให้คงที่) และส่วนทวีแรงดัน โดยจะกล่าวถึงการออกแบบ ส่วนต่าง ๆ โดยละเอียดดังต่อไปนี้

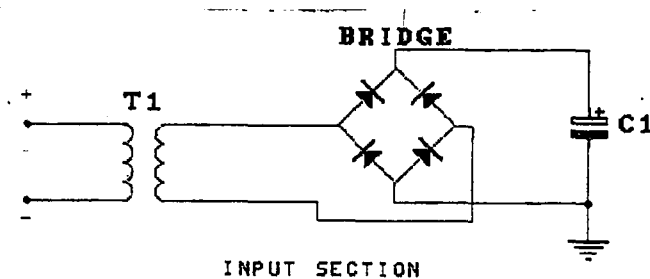
3.2.2.1 การออกแบบส่วนขาเข้า (Input Section)

ส่วนขาเข้าที่ใช้ เป็นแรงดันขาเข้า 24 โวลต์ กระแส 1 แอมแปร์ ซึ่งได้มาจากหม้อแปลงธรรมดา ที่แปลงจากไฟ 220 โวลต์ ลงมาเหลือ 24 โวลต์แล้วทำการเรียงกระแสแบบบริดจ์ที่สามารถทนแรงดันได้ 200 โวลต์และทนกระแส 2 แอมแปร์ทำการเรียงให้เป็นกระแสตรง จากนั้นผ่านภาคกรองกระแสโดยใช้ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีค่าความจุคือ 100 ไมโครฟาหรัด แรงดันที่ได้คือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ซึ่งจะมีค่าประมาณ

$$24 \text{ V} \times 1.4 = 33.6 \text{ V}$$

เมื่อ 1.4 คือ ค่าที่ใช้แปลงค่า V_{rms} ให้เป็นค่าแรงดันตรง

ซึ่งก็คือค่าแรงดันขาเข้าของส่วนสวิทช์ซึ่งต่อไป



รูปที่ 3.16 แสดงวงจรส่วนขาเข้า (Input Section)

3.2.2.2 การออกแบบส่วนสวิทช์ซึ่ง

ในส่วนสวิทช์ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือการหาทรานซิสเตอร์ ที่ใช้ในวงจรสวิทช์ซึ่ง และการสร้างหม้อแปลงความถี่สูง และการใช้วงจรควบคุมการสวิทช์ให้คงที่

(ก) การหาทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรนั้น ก็คือ การหาค่าแรงดัน ที่ทรานซิสเตอร์จะต้องทนเมื่อสวิทช์เปิด ซึ่งเป็นค่าแรงดันย้อนกลับสูงสุด และค่าอัตราการทนกระแสสูงสุดที่จะไหลผ่านตัวมันเมื่อสวิทช์ปิด ค่าแรงดันสูงสุดที่ทรานซิสเตอร์จะต้องทนได้คำนวณได้จากสูตร 2.5.1 เมื่อ ค่า V_{in}

มีค่า 24 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดของไฟตรง 40 โวลต์ที่ได้มาจากส่วนขาเข้า ที่ต้องใช้ค่าต่ำสุดก็เนื่องมาจากว่าจะ เป็นค่าที่ทำให้ได้ค่า V_{CE} สูงสุด ซึ่งโดยปกติจะต้องใช้ค่าสูงสุดอยู่แล้ว เพื่อป้องกันทรานซิสเตอร์พัง ส่วนค่ารอบการทำงานสูงสุด (Duty Cycle Maximum) นั้น ต้องเลือกที่ค่าต่ำกว่า 50 % เพราะว่าถ้าเลือกที่ครั้งหนึ่ง จะทำให้ทรานซิสเตอร์ ไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างการเปิด และการปิดได้ดี ในที่นี้จะเลือกใช้ค่า 40 % หรือ 0.4 ในการคำนวณ ซึ่งจะ ทำให้ทรานซิสเตอร์มีช่วงเวลามากพอ ที่จะเปลี่ยนสถานะจากการปิด และเปิด เมื่อทำการแทนค่าในสูตรแล้วจะได้ค่า V_{CE} สูงสุดคือ

$$V_{CE,max} = V_{in}/(1-\delta_{max})$$

$$V_{CE,max} = 24/(1-0.4)$$

$$= 40 \text{ โวลต์}$$

การคำนวณค่ากระแสที่ทรานซิสเตอร์ต้องทนได้ หาได้จากสูตร 2.5.4 ซึ่งก็จะเป็นค่ากระแสที่ผ่านขดลวดปฐมภูมิเช่นกัน เนื่องจากค่ากระแสที่ได้ออกมาจากส่วนขาเข้า มาจากหม้อแปลงตัวหนึ่งก่อนแล้วซึ่งมีค่าได้ไม่เกิน 1 แอมแปร์ ดังนั้นทรานซิสเตอร์ที่ใช้ก็ต้องทนกระแสได้ 1 แอมแปร์ด้วย จากค่าแรงดันและกระแสที่คำนวณได้ จึงเลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ MJ15011 เพราะมีคุณสมบัติที่ต้องการ รวมทั้งมีค่าการสูญเสียกำลังที่ค่อนข้างมาก และเป็นทรานซิสเตอร์ที่ใช้กับความถี่สูง (Switching Transistor) ได้ด้วยซึ่งคุณสมบัติทั้งหมดแสดงอยู่ในภาคผนวก ก

(ข) ในส่วนของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงนั้น ได้กล่าวในรายละเอียดในหัวข้อ 2.5.3.2 แล้ว ดังจะได้ทำการคำนวณและเลือกอุปกรณ์ เป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมินั้น ก็คือค่ากระแสคอลเลคเตอร์ ที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์นั่นเอง ซึ่งจะมีค่าไม่เกิน 1 แอมแปร์ ด้วยเหตุผลในหัวข้อ (ก) ข้างต้น
- 2) ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมินั้น มีส่วนสัมพันธ์กับค่ากระแสในข้อ 1) ดังสูตรที่ 2.5.8 ทำการแทนค่าโดยเลือกค่าความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ 20 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่ไม่สูงมากนัก ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้อย่างดีอีกด้วย

$$L_p = (V_{in} \times \delta_{max}) / I_{cp} \times f$$

$$= (24 \times 0.4) / 1 \times 20000$$

$$= 480 \text{ ไมโครเฮนรี่}$$

3) เลือกชนิดและขนาดของแกน โดยใช้แกน E-I เนื่องจากว่าสามารถพันขดลวดได้ง่ายและเป็น ที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย โดยขนาดของแกนที่ต้องใช้คำนวณหาได้จากสูตร

$$\begin{aligned}
 A_c A_w &= (25.32 \times L_p I_{pD}^2 \times 10^8) / B_{max} \\
 &= (25.32 \times 480 \times 10^{-8} \times 1 \times 0.02 \times 10^8) / 2350 \\
 &= 0.2 \text{ ตารางเซนติเมตร}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของลวดทองแดงที่ใช้สำหรับพันหม้อแปลง

AWG	Diameter over insulation (inches)		Nominal circular mil area	Resistance per 1000 ft	Current capacity in milliamperes based on 1000 c.m./A	AWG
	Min.	Max.				
8	0.130	0.133	16510	0.6281	16510	8
9	0.116	0.119	13090	0.7925	13090	9
10	0.104	0.106	10380	0.9985	10380	10
11	0.0928	0.0948	8230	1.261	8226	11
12	0.0829	0.0847	6530	1.588	6529	12
13	0.0741	0.0757	5180	2.001	5184	13
14	0.0667	0.0682	4110	2.524	4109	14
15	0.0595	0.0609	3260	3.181	3260	15
16	0.0532	0.0545	2580	4.020	2581	16
17	0.0476	0.0488	2050	5.054	2052	17
18	0.0425	0.0437	1620	6.386	1624	18
19	0.0380	0.0391	1290	8.046	1289	19
20	0.0340	0.0351	1020	10.13	1024	20
21	0.0302	0.0314	812	12.77	812.3	21
22	0.0271	0.0281	640	16.20	640.1	22
23	0.0244	0.0253	511	20.30	510.8	23
24	0.0218	0.0227	404	25.67	404	24
25	0.0195	0.0203	320	32.37	320.4	25
26	0.0174	0.0182	253	41.02	252.8	26
27	0.0157	0.0164	202	51.44	201.6	27
28	0.0141	0.0147	159	65.31	158.8	28
29	0.0127	0.0133	128	81.21	127.7	29
30	0.0113	0.0119	100	103.7	100	30
31	0.0101	0.0108	79.2	130.9	79.21	31
32	0.0091	0.0098	64	162	64	32
33	0.0081	0.0088	50.4	205.7	50.41	33
34	0.0072	0.0078	39.7	261.3	39.69	34
35	0.0064	0.0070	31.4	330.7	31.36	35

เมื่อค่า D คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเบอร์ 24 ซึ่งหาได้โดยการนำค่ากระแส คูณกับ 400 ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นกระแส 400 เซนติเมตรต่อ 1 แอมแปร์ ได้เป็น $1 \times 400 = 400$ นำไปเทียบกับค่าในตารางข้างล่าง ในช่องแล้วค่าความหนาแน่นกระแส ก็จะได้เบอร์ลวดเป็น A.W.G 24 จากนั้นก็ดูในช่อง เส้นผ่านศูนย์กลางที่มากที่สุดคือ 0.0227 นี้ก็จะได้นี้ไปแทน

ในสูตรข้างต้น ส่วนค่า L_p และ I_{pp} นั้นก็คือค่าเดียวกับที่คำนวณได้ในข้อ 2) และ 1) ตามลำดับ ค่า B_{max} คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวสูงสุด ซึ่งปกติจะให้มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัว B_{sat} ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารเฟอร์ไรต์ที่นำมาทำแกน ซึ่งในที่นี้เลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์ของบริษัท ฟุจิอิเลคโตรเคมีคอล จำกัด ซึ่งใช้สารที่มีรหัสทางการค้าเป็น H45 ซึ่งมีค่า B_{sat} เป็น 4500 เกาส์ เพราะฉะนั้น จะได้ค่า B_{max} เป็น $4700/2$ ได้เป็น 2350 เกาส์ นำไปแทนลงในสูตร จะได้ค่าขนาดของแกนออกมา เมื่อนำไปเทียบกับขนาดของแกนที่มีขายของบริษัท ฟุจิอิเลคโตรเคมีคอล จำกัด ซึ่งรายละเอียดจะอยู่ใน ภาคผนวก ข แล้ว โดยเลือกใช้แกน E-I 50 สำหรับใช้ในการทำหม้อแปลงความถี่สูง เพราะมีขนาดใหญ่กว่าค่าที่คำนวณได้พอสมควร ทำให้ค่าการอิ่มตัวของแกน สามารถเพิ่มได้จากที่คำนวณได้ไปอีก

- 4) ทำการหาค่าความยาว ของช่องอากาศ (The Core Air Gap Length) ที่จะต้องใช้ในการพันหม้อแปลงจากสูตรที่ 2.5.10 คือ

$$\begin{aligned}
 l_g &= (0.4\pi L_p I_{pp}^2) 10^8 \\
 &= (0.4\pi \times 480 \times 10^{-6} \times 1^2) 10^8 \\
 &= 4.7 \times 10^{-3} \text{ เซนติเมตร}
 \end{aligned}$$

- 5) เมื่อทราบค่าต่างๆ จากข้อ 1-4 แล้วจะทำให้สามารถหาค่าจำนวนรอบ ของขดลวดปฐมภูมิได้จากสูตรที่

$$\begin{aligned}
 N_p &= (L_p I_{pp} \times 10^8) / A_g B_{max} \\
 &= (480 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^8) / 2.3 \times 2350 \\
 &= 9 \text{ รอบ}
 \end{aligned}$$

เมื่อ A_g นั้นหาได้จากคู่มือแกน E-I 50 ในภาคผนวก ข หรือหาค่าจำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ ได้จากความสัมพันธ์ในสูตร 2.5.11

$$\begin{aligned}
 N_p &= (l_g B_{max}) / 0.4\pi I_{pp} \\
 &= (4.7 \times 10^{-3} \times 2350) / 0.4\pi \times 1 \\
 &= 9 \text{ รอบ}
 \end{aligned}$$

จะเห็นว่าค่าที่ได้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน จะเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันมาก โดยประมาณให้มีค่าเป็น 9 รอบ

6) จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมินั้น มาจากความสัมพันธ์พื้นฐานที่ว่า

$$N_1/N_2 = V_1/V_2$$

เมื่อ N_1, N_2 เป็นจำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิตามลำดับ และ V_1, V_2 เป็นแรงดันขาเข้า และขาออกตามลำดับ

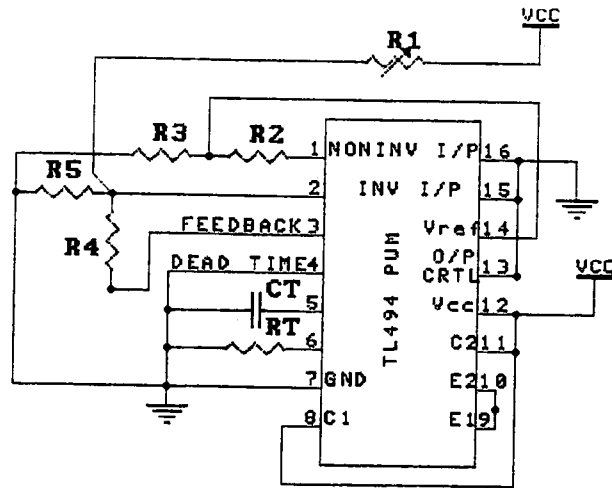
$$9/N_2 = 24/1500$$

$$N_2 = 550 \text{ รอบ}$$

ลวดที่ใช้ในการพันชุดทุติยภูมินี้ หากจากวิธีเดียวกับกับขนาดของลวดปฐมภูมิ แต่เนื่องจากค่ากระแสที่ได้มีน้อยมาก ซึ่งจะทำให้เส้นลวดมีขนาดเล็กมาก ไม่เหมาะแก่การนำมาพันด้วยมือจึงเลือกใช้ลวดที่ไม่ใหญ่และไม่เล็กเกินไป โดยใช้ a.w.g. 34 เคลือบสองชั้นเพื่อป้องกันไฟกระชอก ถ้าเลือกที่มีขนาดใหญ่กว่านี้ ก็จะทำให้สิ้นเปลืองเนื้อที่ในการพันมากเกินไป

เมื่อได้ค่าต่าง ๆ ที่จะต้องใช้ในการพันหม้อแปลงเรียบร้อยแล้ว จึงมาถึงขั้นตอนการพันหม้อแปลง เนื่องจากว่าแรงดันขาออกค่อนข้างสูง ถ้าใช้วิธีการพันปกติ จะทำให้เกิดไฟกระชอก และเส้นลวดเสียหายได้ การพันจึงใช้วิธีพันไม่เต็ม Bobbin เว้นระยะหัวท้ายไว้ประมาณ 3 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันไฟกระชอกข้ามแต่ละชั้น และในแต่ละชั้นพันประมาณ 50 รอบ แล้วจึงใช้กระดาษชุบน้ำมันวานิชซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนปิดทับในแต่ละรอบอีกครั้งหนึ่ง

(ค) ส่วนวงจรควบคุมการสวิตช์ให้คงที่ (Pulse Width Modulator) ที่ใช้นั้น จะใช้เป็นไอซีสำเร็จรูป ที่ทำงานในแบบคงแรงดันให้คงที่ ในโครงการพิเศษนี้ ได้เลือกใช้วงจรรวม (IC) สำเร็จรูป คือ TL494 ซึ่งต้องการอุปกรณ์ภายนอก เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยมีวงจรส่วนนี้ดังรูปที่ 3.17 เมื่อใช้ค่า R_T และ C_T เป็น 5.5 กิโลโอห์ม และ 0.01 ไมโครฟารัดตามลำดับ จะทำให้ได้ค่าความถี่ในการสวิตช์ 20 กิโลเฮิรตซ์ จากสูตร ความถี่ที่ต้องการ = $1/(C_T R_T)$ ทำการต่อขา 9 และ 10 เข้าด้วยกันเช่นเดียวกับขา 8 และ 11 จะทำให้ทรานซิสเตอร์ภายในของไอซีทำงานแบบขนานกัน 2 ตัว ทำให้ได้ค่ากระแสขาออกที่จะไปขับทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการสวิตช์



รูปที่ 3.17 แสดงการต่อวงจรควบคุมของ IC TL494

เพิ่มขึ้นส่วนตัวต้านทานปรับค่าได้นั้น จะปรับค่ารอบการทำงาน ที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) ให้คงค่าที่ต้องการไว้ได้ ซึ่งในกรณีที่นำไปใช้ในส่วนจับเฟ้นแล้ว จะพบว่าแรงดันขาออกตกลงอย่างมาก ซึ่งต้องทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวต้านทานที่จุดนี้ ซึ่งเป็นตัวต้านทานปรับการป้อนกลับของวงจร ที่หา 10 มีตัวต้านทานค่า 1 กิโลโอห์ม ซึ่งใช้สำหรับเพิ่มค่ากระแสที่จะไปขับขยาเบส ของทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์

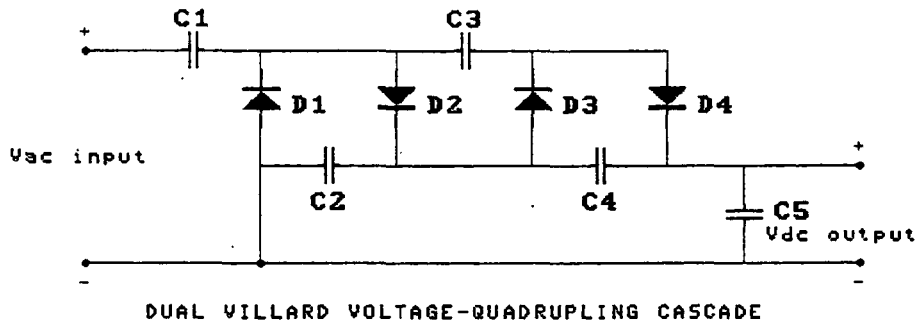
3.2.2.3 การออกแบบส่วนขาออก (Output Section)

ส่วนขาออกของวงจร เนื่องจากใช้วงจรทวีแรงดัน ดังนั้นจึงไม่ต้องทำการเรียงกระแสอีกที่ขาออก เป็นวงจรทวีแรงดันแบบ Dual Villard Voltage Quadrupling Cascade โดยใช้ 2 ชั้น (2 Stages) แรงดันที่ต้องการทวีคือจาก 1000 โวลต์ที่ได้จากส่วนสวิตช์ซึ่ง ให้เพิ่มเป็น 5000 โวลต์ โดยประมาณ ซึ่งจะต้องใช้ไดโอด และตัวเก็บประจุที่สามารถทนแรงดันที่ได้จากการคำนวณจากสูตรการคำนวณค่าแรงดันย้อนกลับ ที่ไดโอดจะต้องทนได้คือ $V_r = 2\sqrt{2} V_{rms}$ เมื่อ V_{rms} คือ ค่าแรงดันเมื่อยังไม่ได้ทำการเรียงกระแสและ n คือ จำนวนชั้นในการทวีแรงดัน

$$V_r = 2x\sqrt{2x1000}$$

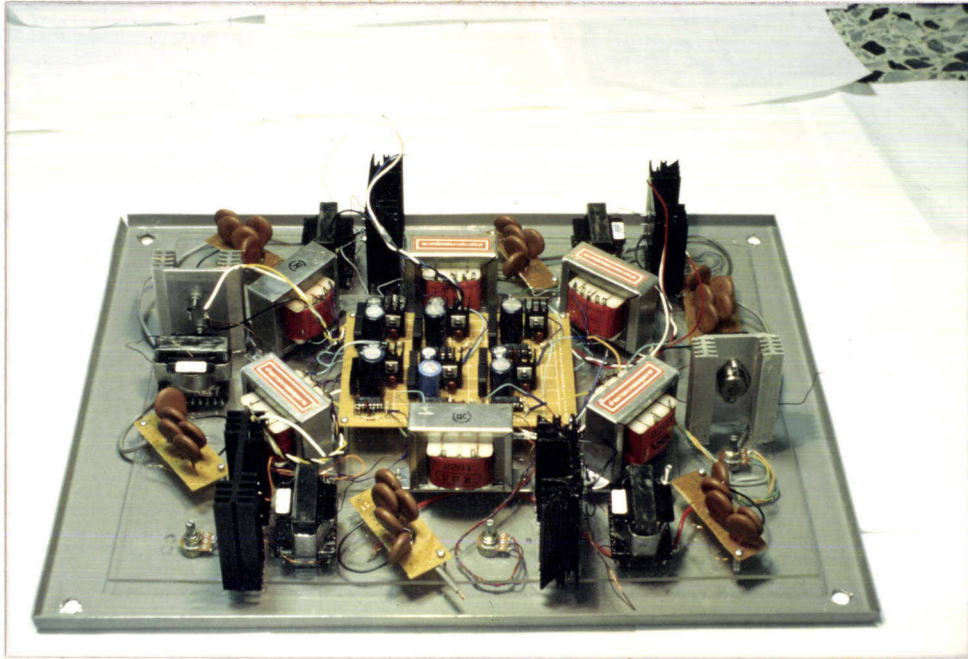
= 3000 โวลต์

ส่วนค่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุจะต้องทนได้ หาได้จากสูตรเดียวกัน



รูปที่ 3.18 แสดงวงจรขาออก

ไดโอดที่ใช้ก็คือเบอร์ GD3000 ซึ่งทนแรงดันได้ 3kV และตัวเก็บประจุที่ใช้ ใช้ตัวเก็บประจุแบบเซรามิค มีค่า 0.01 นาโนฟารัด และสามารถทนแรงดันได้ 5 กิโลโวลต์ ส่วนตัวเก็บประจุเพื่อป้องกันแรงดันกระเพื่อม ใช้ตัวเก็บประจุประเภทเดียวกัน มาอนุกรมกัน 5 ตัวเพื่อให้สามารถทนแรงดันได้ 2 เท่าของแรงดันขาออก ซึ่งมีค่าประมาณ 5-7 กิโลโวลต์โดยประมาณ



ก) แหล่งจ่ายไฟที่ดำเนินการสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว



ข) เมื่อประกอบเข้ากับหอรวบรวมฝุ่น
รูปที่ 3.19 แหล่งจ่ายไฟของเครื่องดักจับฝุ่น

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองวงจรแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง

เมื่อได้ทำการสร้างวงจรตามที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ทำการทดสอบวงจรทำให้ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

- 1) สามารถควบคุมรอบการทำงาน (DUTY CYCLE) ได้ตั้งแต่ 10% ถึง 90% ได้โดยการปรับตัวต้านทานป้อนกลับ ให้มีค่าน้อย คือ เมื่อปรับค่าต้านทานให้มีค่ามากรอบการทำงานจะลดลง และเมื่อปรับค่าต้านทานให้มีค่าน้อยลง ก็จะทำให้ค่ารอบการทำงานมากขึ้นโดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

รอบการทำงาน (%) (DUTY CYCLE)	ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	ค่าแรงดันป้อนกลับ (โวลต์)
10	621	10.51
20	748	10.21
30	861	9.91
40	998	9.61
50	1133	9.29
60	1252	9.00
70	1384	8.70
80	1505	8.41
90	1672	8.00

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานและแรงดันป้อนกลับที่รอบการทำงานต่าง ๆ

- 2) แหล่งจ่ายไฟ 1 ตัวเมื่อยังไม่ได้ต่อวงจรที่แรงดันขาออก เมื่อวัดที่ขั้วลวดที่ติดขุมิ สามารถวัดค่าแรงดันได้ตั้งแต่ประมาณ 700-2000 โวลต์ ขึ้นอยู่กับการปรับค่ารอบการทำงาน และเมื่อวงจรที่แรงดันเข้าไปแล้ว สามารถวัดค่าแรงดันได้เพิ่มขึ้นเป็น 3000-7000 โวลต์ โดยแรงดันที่วัดนี้ วัดเมื่อไม่มีโหลด และมีโหลดเป็นตัวต้านทานค่า 10 เมกกะโอห์ม ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่ารอบการทำงานกับแรงดันและค่ากระแสที่ได้มีดังคือ

รอบการทำงาน (DUTY CYCLE) (%)	ค่าแรงดันที่วัดเมื่อมีวงจรที่แรงดัน (โวลต์)		ค่ากระแส (ไมโครแอมป์)
	ไม่มีโหลด (kV)	มีโหลด (V)	
10	5.75	543	261
20	7.04	930	447
30	7.46	1127	565
40	7.78	1250	602
50	8.15	1190	584
60	8.42	1400	535
70	8.36	949	457
80	7.53	690	337
90	6.17	416	193

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันที่วัดที่ค่ารอบการทำงานต่าง ๆ

- 3) เมื่อนำแหล่งจ่ายไฟ ต่อเข้ากับส่วนปล่อยประจุ (DISCHARGE ELECTRODE) แล้วทำการปรับค่ารอบการทำงานที่ค่าต่างๆ แล้วทำการวัดค่าแรงดันที่เปลี่ยนไป เมื่อมีโหลดเป็นขั้วปล่อยประจุมีค่าดังต่อไปนี้

(DUTY CYCLE) (%)	ค่าแรงดันที่วัดได้ (กิโลโวลต์)
10	3.23
20	4.02
30	4.97
40	5.39
50	6.05
60	6.44
70	6.19
80	5.58
90	4.61

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันขาออกที่ค่ารอบการทำงานต่าง ๆ เมื่อมีโหลดเป็นส่วนปล่อยประจุ

- เมื่อนำแหล่งจ่ายไฟ ต่อเข้ากับส่วนรับประจุ (COLLECTION ELECTRODE) แล้วทำการปรับค่ารอบการทำงานที่ค่าต่างๆ แล้วทำการวัดค่าแรงดันที่เปลี่ยนไป เมื่อมีโหลดเป็นขั้วรับประจุมีค่าดังต่อไปนี้

(DUTY CYCLE) (%)	ค่าแรงดันที่วัดได้ (กิโลโวลต์)
10	1.43
20	2.07
30	2.99
40	3.42
50	4.15
60	4.38
70	4.20
80	3.05
90	2.55

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันขาออกที่ค่ารอบการทำงานต่าง ๆ เมื่อมีโหลดเป็นส่วนรับประจุ

4.2 ผลการทดลองเครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์

การทดลองเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นเ็น แบ่งออกเป็น 2 ตอน ในตอนแรก จะทำการหาความสัมพันธ์ ของขนาดของฝุ่นที่เครื่องสามารถจับได้ ที่ขนาดต่างๆ เมื่อใช้ค่าแรงดัน ป้อนให้กับขั้วปล่อยประจุและขั้วรับฝุ่นคงที่ที่ค่าๆ หนึ่ง ส่วนในตอนที่สองนี้ เป็นการหาความสัมพันธ์ ของค่าแรงดันต่างๆ ว่าที่ค่าแรงดันใด ที่ทำให้เครื่องมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยเปลี่ยนค่าแรงดันไป หลาย ๆ ค่า แล้วทำการใส่ฝุ่นชนิดเดียวกันแล้ววัดปริมาณฝุ่นที่สามารถจับได้

การทดลองตอนที่ 1

1) เมื่อทำการต่อชุดแหล่งจ่ายไฟ เข้ากับอุปกรณ์ดักจับฝุ่นแล้ว จึงทำการทดลองจับฝุ่นขนาดต่างๆ ซึ่งใช้สารตัวอย่าง 3 ชนิดคือ แป้งมัน,ผงซีเมนต์และกระดาษขนาด 0.5 ตารางเซนติเมตร โดยใช้แป้งมันและซีเมนต์ ปริมาณ 1 กิโลกรัมส่วนกระดาษใช้ประมาณ 200 ชิ้นแล้วทำการ ทดลองสารชนิดเดียวกัน 3 ครั้ง แล้วจึงเปลี่ยนเป็นสารชนิดต่อไป แล้วนำสารที่ตกอยู่ในถุงมา ทำการชั่งน้ำหนักเปรียบเทียบกับปริมาณสารเริ่มต้น โดยการทดลองนี้ เลือกใช้ค่าแรงดันไฟฟ้า สำหรับขั้วปล่อยประจุ หรือส่วนที่ 1 ประมาณ 2 กิโลโวลต์ และใช้ค่า 4 กิโลโวลต์ในส่วน ที่ 2 หรือส่วนจับฝุ่น ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5 .

ชนิดของสาร	ปริมาณสารที่วัดได้จากเครื่องดักจับฝุ่น (กรัม/ชิ้น)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
แป้งมัน	347	296	403	347
ผงซีเมนต์	238	316	297	284
กระดาษ	1436	1297	1679	1471

ตารางที่ 4.5 ปริมาณสารตัวอย่างชนิดต่างๆ ที่จับได้จากเครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์

- 2) เมื่อทำการหาปริมาณสารที่ออกมาจากอากาศ ในทางเดินขาออก เนื่องจากปริมาณลมแรงมาก จึงใช้วิธีการนำผ้าบาง ที่มีสีเข้มไปรออยู่ที่ปากทางออกของอากาศ เพื่อที่จะดูว่ามีปริมาณสารที่ หลุดออกมาว่ามีมากน้อยเพียงไร แต่ไม่สามารถที่จะวัดปริมาณที่แน่นอนได้ แต่ได้ทำการเปรียบเทียบกันได้ผลดังนี้คือ

แป้งมันสามารถหลุดล่อนออกมาในทางเดินอากาศขาออกได้น้อยมาก

ผงซีเมนต์สามารถหลุดล่อนออกมาในทางเดินอากาศขาออกได้น้อยมากเช่นกัน แต่เมื่อ เทียบกับแป้งมันแล้วมีปริมาณมากกว่าเล็กน้อย

กระดาษจากตัวอย่าง 2200 ชั้น มีเพียง 1 ชั้นเท่านั้นที่หลุดออกมาในทางเดินอากาศ ขาออกได้

เมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพโดยประมาณของเครื่อง ก็คือ ประสิทธิภาพในการจับฝุ่นผงซีเมนต์และ แป้งมันประมาณ 95% และ ประมาณ 99% สำหรับชั้นกระดาษ

- 3) ค่าความเร็วลมขาเข้ามีค่าประมาณ 3 เมตรต่อวินาที

ค่าความเร็วลมขาออกมีค่าประมาณมากกว่า 30 เมตรต่อวินาที

การทดลองตอนที่ 2

ทำการทดลองโดยการใช้กระดาษเป็นสารตัวอย่าง ในปริมาณ 2000 ชั้นเพื่อ ทดสอบว่าค่าแรงดันใด มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมากที่สุด โดยทำการเปลี่ยนค่า แรงดันตั้งแต่ 1-4 กิโลวัตต์ในส่วนของหัวรับฝุ่น และ 1-4 กิโลวัตต์ในส่วนของหัวปล่อยประจุ โดยมี การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันดังต่อไปนี้

ค่าแรงดัน (กิโลโวลต์)							
ส่วนที่ 1	ส่วนที่ 2	ส่วนที่ 1	ส่วนที่ 2	ส่วนที่ 1	ส่วนที่ 2	ส่วนที่ 1	ส่วนที่ 2
1	1	2	1	3	1	4	1
1	2	2	2	3	2	4	2
1	3	2	3	3	3	4	3
1	4	2	4	3	4	4	4

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ให้กับส่วนที่ 1 และ 2

ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

- 1) เมื่อแรงดันไฟฟ้าส่วนหน้า มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าส่วนหลัง กระจกสามารถที่จะลอยอยู่ในอากาศ ระหว่างแผ่นรับแผ่นได้ แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าส่วนหลัง มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับส่วนปล่อยประจุส่วนหน้า กระจกจะไม่ลอยติดอยู่ระหว่างแผ่นรับประจุเลย แต่จะตกลงสู่มือเก็บแผ่นหรือปลิวออกทางด้านท้ออากาศขาออก
- 2) เมื่อเพิ่มแรงดันมากขึ้นก็จะยิ่งทำให้ฝุ่นติดมากขึ้น โดยจะเห็นความแตกต่างชัดเจน เมื่อค่าแรงดันมีค่าต่างกันมากๆ เช่น ที่แรงดันส่วนแรก 1 กิโลโวลต์ และส่วนหลัง 2 กิโลโวลต์กระจกจะติดได้น้อยกว่าอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อให้แรงดันส่วนหน้า 2 กิโลโวลต์และส่วนหลัง 4 กิโลโวลต์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

ตอนที่ 1 แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง

1. ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งนั้น สามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยการปรับค่ารอบการทำงานของทรานซิสเตอร์ ซึ่งตรงกับหลักการของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งกล่าวคือ เมื่อมีโหลดมาก แรงดันขาออกตกลง ตัว PWM ก็จะได้รับสัญญาณป้อนกลับมากกระตุ้นให้ค่ารอบการทำงานเพิ่มขึ้น เพื่อที่จะทำให้แรงดันขาออกมีค่ามากขึ้น ให้มีค่าเท่ากับ เมื่อยังไม่มีโหลด
2. การเปลี่ยนแปลงค่ารอบการทำงานจะมีผลอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10-20 % เท่านั้นที่รอบการทำงาน 80% ขึ้นไป จะได้ค่าแรงดันลดลง เนื่องจากว่า ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นสวิตช์เปิดเกือบจะตลอดเวลา ทำให้ค่าแรงดันที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลง
3. วงจรทวิแรงดันสามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับจุดที่ได้คำนวณไว้ จากสูตร

$$V_{rms} = 2\sqrt{2} V_{rms}$$

และแรงดันที่ได้เป็นแรงดันตรง (DC Voltage)

ตอนที่ 2 เครื่องดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์

1. ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้ามากขึ้น จะทำให้สามารถดักจับฝุ่นได้เพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงค่าแรงดันค่าหนึ่งจะทำให้เกิดการอาร์คขึ้น
2. ค่าแรงดันไฟฟ้าในส่วนที่ 1 จะต้องมีค่าน้อยกว่าในส่วนที่ 2 จึงจะสามารถดักจับฝุ่นได้ เนื่องจากถ้าให้ค่าแรงดันส่วนหน้าสูงกว่าหรือเท่ากับส่วนที่ 2 ฝุ่นก็จะไม่เข้าไปสู่ส่วนที่ 2 จะหยุดอยู่แค่ส่วนหน้า แต่เนื่องจากส่วนหน้ามีพื้นที่ในดักจับน้อย ฉะนั้นจึงทำให้ฝุ่นไม่สามารถติดอยู่ได้
3. ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นแปรตามขนาดของฝุ่น เมื่อฝุ่นมีขนาดเล็กลงก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นลดลงตามไปด้วย
4. ค่าแรงจากตัวสั้นที่ให้กับส่วนดักจับฝุ่น มีค่าไม่เพียงพอ ที่จะทำให้ฝุ่นขนาดเล็กหลุดออกจากแผ่นรวบรวมฝุ่นได้ต้องใช้วิธีการล้าง เพื่อนำฝุ่นชนิดนี้ออกมา แต่ถ้าเป็นฝุ่นที่มีขนาดใหญ่จะสามารถหลุดลงมาได้บ้าง แต่อย่างไรก็ตามฝุ่นจำนวนมากจะค้างอยู่ตรงหม้อเก็บฝุ่น ทำให้ประสิทธิภาพที่คำนวณไม่ใช่ประสิทธิภาพที่แท้จริงของเครื่องดักจับฝุ่นนี้

เอกสารอ้างอิง

1. George C. Chryssis in High Frequency Switching Power Supply McGraw-Hill, 1989
2. Odon Ferenczi in Power Supplies , Studies in Electrical and Electronic Engineering 26, pt. A pp. 210-230, pt. B pp.436-447, 470-475, Aka demiai Klado, 1987
3. J.A.Cross in Electrostatics:Principles, Problems and Applications PP. 46-60, 144-163, IOP Publishing Limited, 1987
4. R.D. Ross in Air Pollution and Industry, Van Nostrand Reinhold Environmental Engineering Series, pp. 379-411, Litton Education Publishing Inc, 1972
5. Honer W.Parker in Air Pollution, pp.159-177, Prentice Hall, Inc., 1977
6. Frank L.Gross, Howard E. Hesketh in Handbook for The Operation and Maintenance of Air Pollution Control Equipment, Teschnomic Publishing Co., Inc., 1975
7. Calvin R. Brunner in Handbook of Incineration Systems, pp. 22.21-22.41, McGraw-Hill, Inc., 1991
8. Coper, Alley in Air Pollution Control: A Design Approach, pp. 129-153, PWS Publishers, 1986
9. Robert M.Bethea in Air Pollution Control Technology, Van Nostrand Reinhold Environmental Engineering Series, pp. 209-250, Litton Educational Publishing, Inc., 1978
10. Jaroslav Bohm in Eelectrostatic Percipitators, Chemical engineering monographs vol. 14, Cycchoslovakia, 1982

ກາລະພາບ ກ

MJ16010A*
MJW16010A*

*Motorola preferred devices

POWER TRANSISTORS
 15 AMPERES
 500 VOLTS
 125 and 175 WATTS

Designer's Data Sheet
NPN Silicon Power Transistors
1 kV Switchmode Series

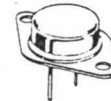
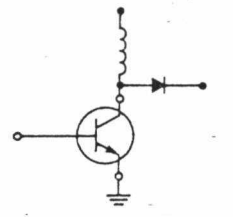
These transistors are designed for high-voltage, high-speed, power switching in inductive circuits where fall time is critical. They are particularly suited for line-operated switchmode applications.

Typical Applications:

- Switching Regulators
- Inverters
- Solenoids
- Relay Drivers
- Motor Controls
- Deflection Circuits

Features:

- Collector-Emitter Voltage — $V_{CEV} = 1000$ Vdc
- Fast Turn-Off Times
 - 50 ns Inductive Fall Time — 100°C (Typ)
 - 90 ns Inductive Crossover Time — 100°C (Typ)
 - 900 ns Inductive Storage Time — 100°C (Typ)
- 100°C Performance Specified for:
 - Reverse-Biased SOA with Inductive Load
 - Switching Times with Inductive Loads
 - Saturation Voltages
 - Leakage Currents
- Extended FBSOA Rating Using Ultra-fast Rectifiers
- Extremely High RBSOA Capability



CASE 1-07
 TO-204AA
 MJ16010A



CASE 340F-02
 TO-247AE
 MJW16010A

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	MJ16010A	MJW16010A	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}		500	Vdc
Collector-Emitter Voltage	V_{CEV}		1000	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EB}		6	Vdc
Collector Current — Continuous	I_C		15	Adc
Collector Current — Peak(1)	I_{CM}		20	Adc
Base Current — Continuous	I_B		10	Adc
Base Current — Peak(1)	I_{BM}		15	Adc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	P_D	175	135	Watts
@ $T_C = 100^\circ\text{C}$		100	54	
Derate above $T_C = 25^\circ\text{C}$		1	1.09	W/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-65 to 200	-55 to 150	°C

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max		Unit
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	1	0.92	°C/W
Lead Temperature for Soldering Purposes: 1/8" from Case for 5 Seconds	T_L	275		°C

(1) Pulse Test: Pulse Width = 5 ms, Duty Cycle $\leq 10\%$.

Designer's Data for "Worst Case" Conditions — The Designer's Data Sheet permits the design of most circuits entirely from the information presented. Limit curves — representing boundaries on device characteristics — are given to facilitate "worst case" design.

3

MJ16010A, MJW16010A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_C = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS(1)					
Collector-Emitter Sustaining Voltage (Table 1) (I _C = 100 mA, I _B = 0)	V _{CEO(sus)}	500	—	—	Vdc
Collector Cutoff Current (V _{CEV} = 1000 Vdc, V _{BE(off)} = 1.5 Vdc) (V _{CEV} = 1000 Vdc, V _{BE(off)} = 1.5 Vdc, T _C = 100°C)	I _{CEV}	—	0.003 0.020	0.15 1.0	mAdc
Collector Cutoff Current (V _{CE} = 1000 Vdc, R _{BE} = 50 Ω, T _C = 100°C)	I _{CER}	—	0.020	1.0	mAdc
Emitter Cutoff Current (V _{EB} = 6 Vdc, I _C = 0)	I _{EBO}	—	0.005	0.15	mAdc

SECOND BREAKDOWN

Second Breakdown Collector Current with Base Forward Biased	I _{S/b}	See Figure 14a or 14b			
Clamped Inductive SOA with Base Reverse Biased	RBSOA	See Figure 15			

ON CHARACTERISTICS(1)

Collector-Emitter Saturation Voltage (I _C = 5 Adc, I _B = 1 Adc) (I _C = 10 Adc, I _B = 2 Adc) (I _C = 10 Adc, I _B = 2 Adc, T _C = 100°C)	V _{CE(sat)}	—	0.25 0.45 0.60	0.7 1 1.5	Vdc
Base-Emitter Saturation Voltage (I _C = 10 Adc, I _B = 2 Adc) (I _C = 10 Adc, I _B = 2 Adc, T _C = 100°C)	V _{BE(sat)}	—	1.2 1.2	1.5 1.5	Vdc
DC Current Gain (I _C = 15 Adc, V _{CE} = 5 Vdc)	h _{FE}	5	8	—	—

DYNAMIC CHARACTERISTICS

Output Capacitance (V _{CB} = 10 Vdc, I _E = 0, f _{test} = 1 kHz)	C _{ob}	—	—	400	pF
---	-----------------	---	---	-----	----

3

SWITCHING CHARACTERISTICS

Inductive Load (Table 1)							
Storage Time	I _C = 10 Adc, I _{B1} = 1.3 Adc, V _{BE(off)} = 5 Vdc, V _{CE(pk)} = 400 Vdc	(T _J = 100°C)	t _{sv}	—	900	2000	ns
Fall Time			t _{fi}	—	50	250	
Crossover Time			t _c	—	90	300	
Storage Time		(T _J = 150°C)	t _{sv}	—	1100	—	
Fall Time			t _{fi}	—	70	—	
Crossover Time			t _c	—	120	—	
Resistive Load (Table 2)							
Delay Time	I _C = 10 Adc, V _{CC} = 250 Vdc, I _{B1} = 1.3 Adc, PW = 30 μs, Duty Cycle ≤ 2%	(I _{B2} = 2.6 Adc, R _{B2} = 1.6 Ω)	t _d	—	25	100	ns
Rise Time			t _r	—	325	600	
Storage Time			t _s	—	1300	3000	
Fall Time		t _f	—	175	400		
Storage Time		t _s	—	700	—		
Fall Time		t _f	—	80	—		

(1) Pulse Test: PW = 300 μs, Duty Cycle < 2%.

MJ16010A, MJW16010A

TYPICAL STATIC CHARACTERISTICS

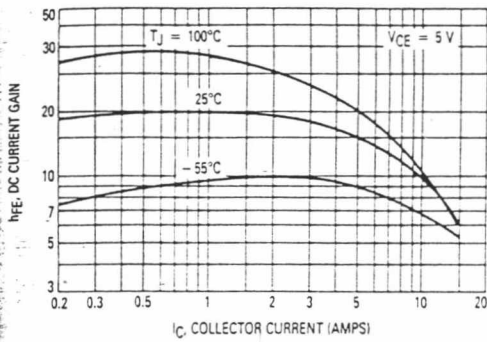


Figure 1. DC Current Gain

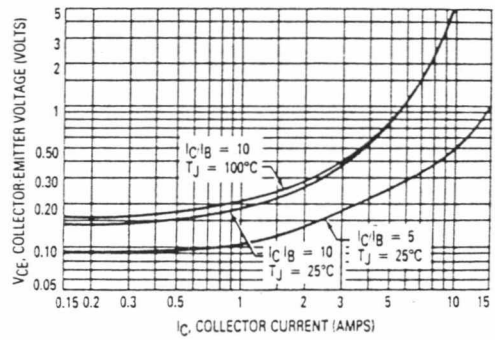


Figure 2. Collector-Emitter Saturation Region

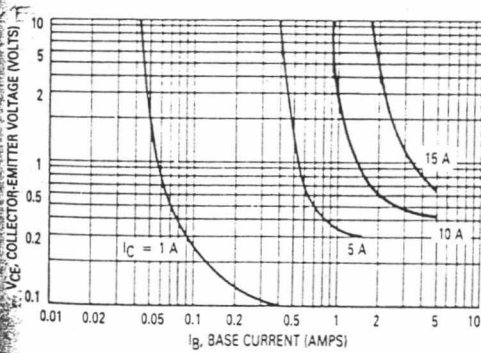


Figure 3. Collector-Emitter Saturation Region

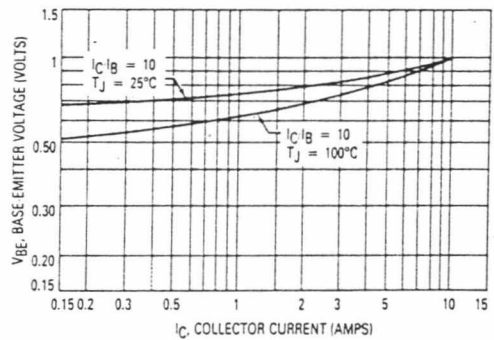


Figure 4. Base-Emitter Saturation Region

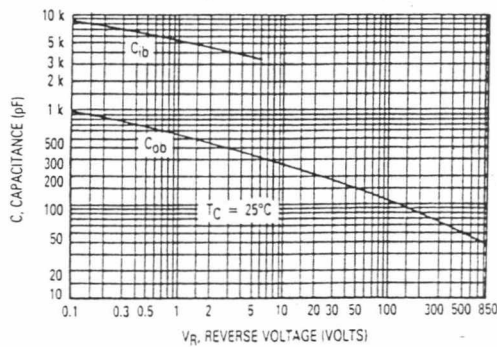


Figure 5. Capacitance

3

MJ16010A, MJW16010A

TYPICAL INDUCTIVE SWITCHING CHARACTERISTICS

$I_C/I_{B1} = 5, T_C = 75^\circ\text{C}, V_{CE(pk)} = 400\text{ V}$

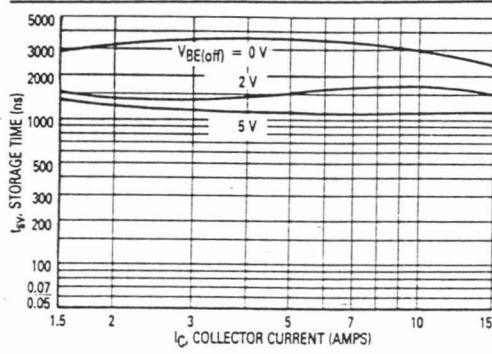


Figure 6. Storage Time

$I_C/I_{B1} = 10, T_C = 75^\circ\text{C}, V_{CE(pk)} = 400\text{ V}$

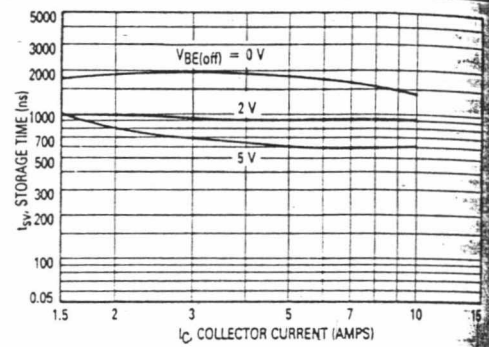


Figure 7. Storage Time

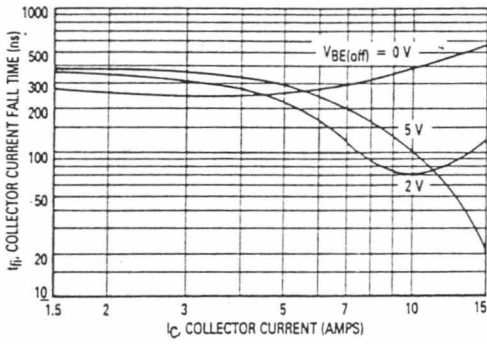


Figure 8. Collector Current Fall Time

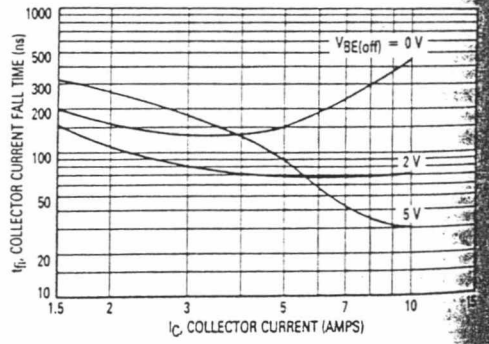


Figure 9. Collector Current Fall Time

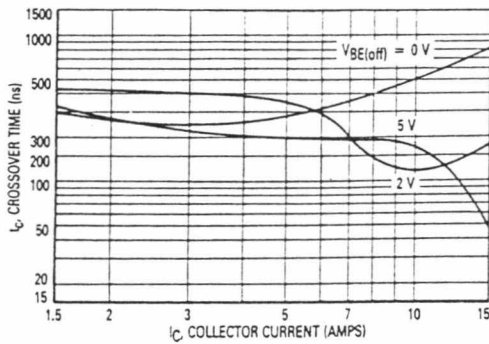


Figure 10. Crossover Time

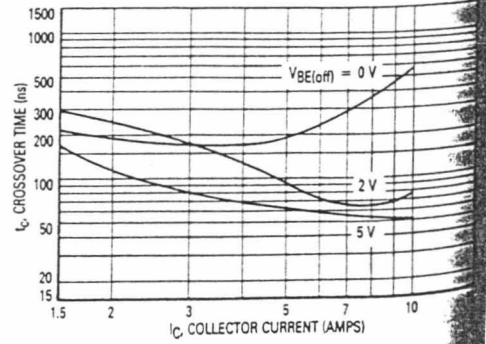
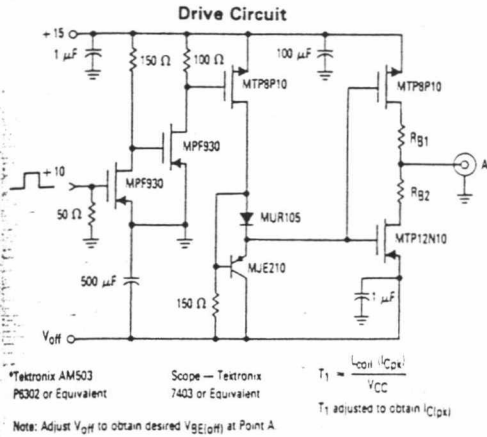


Figure 11. Crossover Time

MJ16010A, MJW16010A

Table 1. Inductive Load Switching



*Tektronix AM503
PS302 or Equivalent
Scope — Tektronix
7403 or Equivalent
Note: Adjust V_{off} to obtain desired $V_{BE(off)}$ at Point A.

$$T_1 = \frac{L_{load} \cdot I_{C(pk)}}{V_{CC}}$$

T_1 adjusted to obtain $I_{C(pk)}$

$V_{CE(sus)}$
 $L = 10 \text{ mH}$
 $R_{B2} = \infty$
 $V_{CC} = 20 \text{ Volts}$
 $I_{C(pk)} = 100 \text{ mA}$

Inductive Switching
 $L = 200 \mu\text{H}$
 $R_{B2} = 0$
 $V_{CC} = 20 \text{ Volts}$
 R_{B1} selected for desired I_{B1}

RBSOA
 $L = 200 \mu\text{H}$
 $R_{B2} = 0$
 $V_{CC} = 20 \text{ Volts}$
 R_{B1} selected for desired I_{B1}

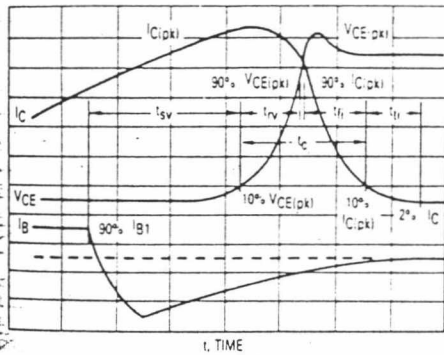
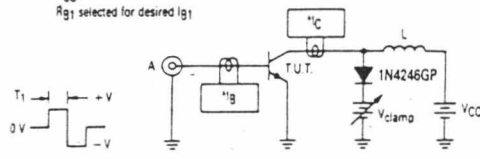
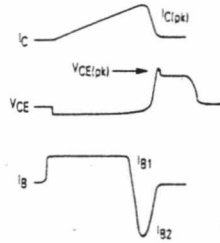


Figure 12. Inductive Switching Measurements

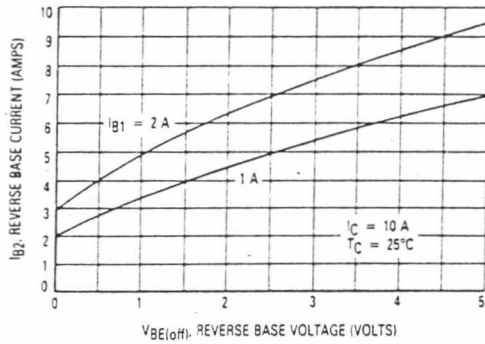
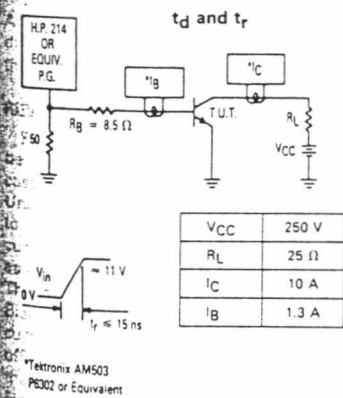
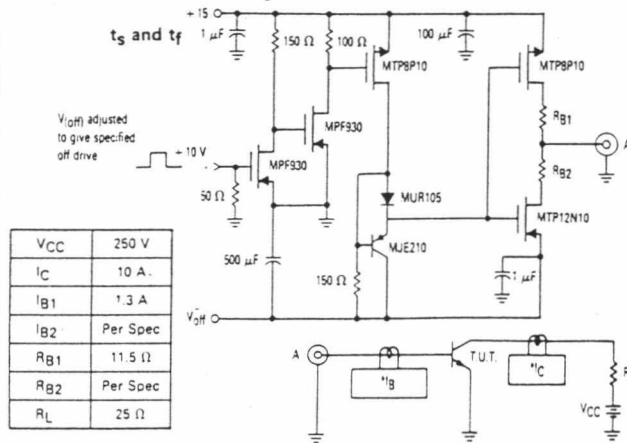


Figure 13. Peak Reverse Base Current

Table 2. Resistive Load Switching



*Tektronix AM503
PS302 or Equivalent



V_{CC}	250 V
R_L	25 Ω
I_C	10 A
I_{B1}	1.3 A
I_{B2}	Per Spec
R_{B1}	11.5 Ω
R_{B2}	Per Spec
R_L	25 Ω

MJ16010A, MJW16010A

GUARANTEED OPERATING AREA INFORMATION

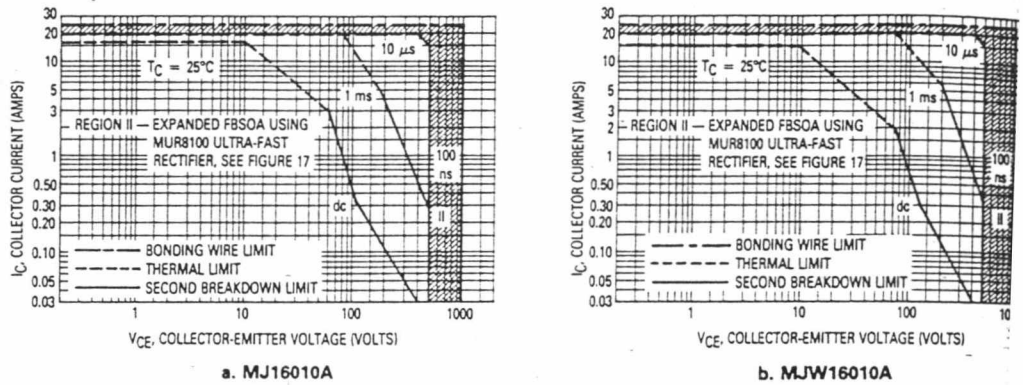


Figure 14. Maximum Rated Forward Biased Safe Operating Area

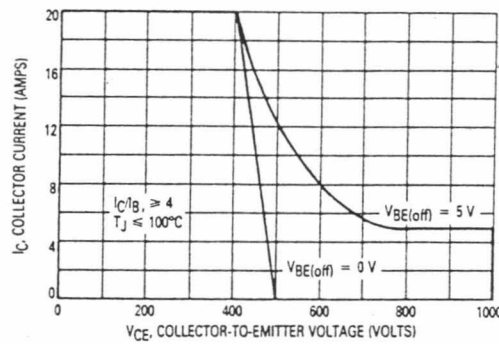


Figure 15. Maximum Reverse Biased Safe Operating Area

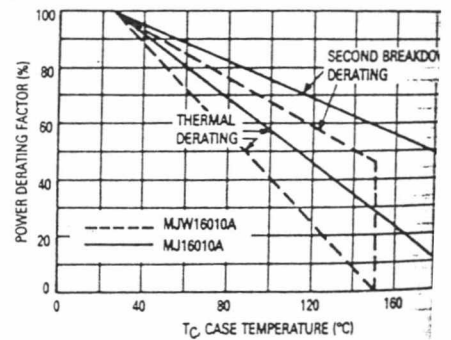


Figure 16. Power Derating

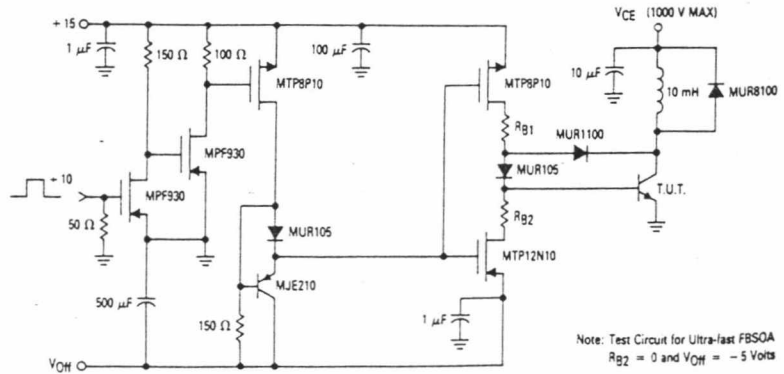


Figure 17. Switching Safe Operating Area

3

MJ16010A, MJW16010A

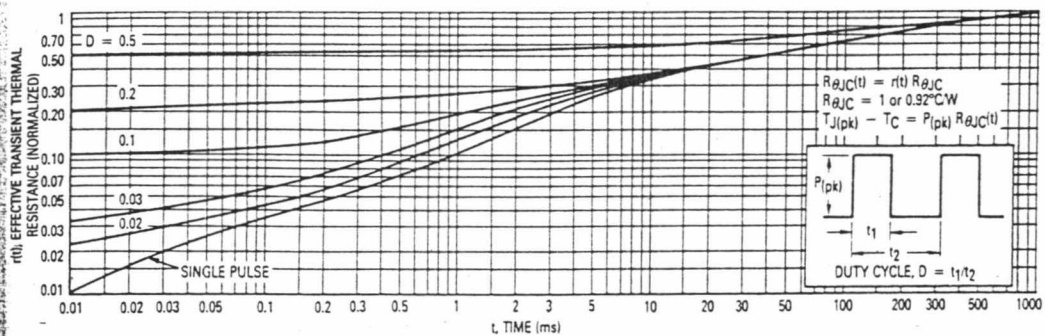


Figure 18. Thermal Response

SAFE OPERATING AREA INFORMATION

FORWARD BIAS

There are two limitations on the power handling ability of a transistor: average junction temperature and second breakdown. Safe operating area curves indicate I_C - V_{CE} limits of the transistor that must be observed for reliable operation; i.e., the transistor must not be subjected to greater dissipation than the curves indicate.

The data of Figures 14a and 14b is based on $T_C = 25^\circ\text{C}$; $T_J(\text{pk})$ is variable depending on power level. Second breakdown pulse limits are valid for duty cycles to 10% but must be derated when $T_C \geq 25^\circ\text{C}$. Second breakdown limitations do not derate the same as thermal limitations. Allowable current at the voltages shown on Figures 14a and 14b may be found at any case temperature by using the appropriate curve on Figure 16.

$T_J(\text{pk})$ may be calculated from the data in Figure 18. At high case temperatures, thermal limitations will reduce the power that can be handled to values less than the limitations imposed by second breakdown.

REVERSE BIAS

For inductive loads, high voltage and high current must be sustained simultaneously during turn-off, in most cases, with the base-to-emitter junction reverse biased. Under these conditions the collector voltage must be held to a safe level at or below a specific value of collector current. This can be accomplished by several means such as active clamping, RC snubbing, load line shaping, etc. The safe level for these devices is specified as Reverse Biased Safe Operating Area and represents the voltage-current condition allowable during reverse biased turn-off. This rating is verified under clamped conditions so that the device is never subjected to an avalanche mode. Figure 15 gives the RBSOA characteristics.

SWITCHMODE DESIGN CONSIDERATIONS

1. FBSOA —

Allowable dc power dissipation in bipolar power transistors decreases dramatically with increasing collector-emitter voltage. A transistor which safely dissipates 100 watts at 10 volts will typically dissipate less than 10 watts at its rated $V_{CE0}(\text{sus})$. From a power handling point of view, current and voltage are not interchangeable (see Application Note AN875).

2. TURN-ON —

Safe turn-on load line excursions are bounded by pulsed FBSOA curves. The 10 μs curve applies for resistive loads, most capacitive loads, and inductive loads that are clamped by standard or fast recovery rectifiers. Similarly, the 100 ns curve applies to inductive loads which are clamped by ultra-fast recovery rectifiers, and are valid for turn-on crossover times less than 100 ns (see Application Note AN952).

At voltages above 75% of $V_{CE0}(\text{sus})$, it is essential to provide the transistor with an adequate amount of base drive VERY RAPIDLY at turn-on. More specifically, safe operation according to the curves is dependent upon base current rise time being less than collector current rise time. As a general rule, a base drive compliance voltage in excess of 10 volts is required to meet this condition (see Application Note AN875).

3. TURN-OFF —

A bipolar transistor's ability to withstand turn-off stress is dependent upon its forward base drive. Gross overdrive violates the RBSOA curve and risks transistor failure. For this reason, circuits which use fixed base drive are often more likely to fail at light loads due to heavy overdrive (see Application Note AN875).

MJ16010A, MJW16010A

SWITCHMODE DESIGN CONSIDERATIONS (Cont.)

4. OPERATION ABOVE V_{CEO(sus)} —

When bipolars are operated above collector-emitter breakdown, base drive is crucial. A rapid application of adequate forward base current is needed for safe turn-on, as is a stiff negative bias needed for safe turn-off. Any hiccup in the base-drive circuitry that even momentarily violates either of these conditions will likely cause the transistor to fail. Therefore, it is important to design the driver so that its output is negative in the absence of anything but a clean crisp input signal (see Application Note AN952).

5. RBSOA —

Reverse Biased Safe Operating Area has a first order dependency on circuit configuration and drive parameters. The RBSOA curves in this data sheet are valid only for the conditions specified. For a comparison of RBSOA

results in several types of circuits (see Application Note AN951).

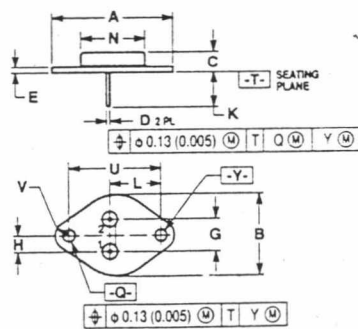
6. DESIGN SAMPLES —

Transistor parameters tend to vary much more from wafer lot to wafer lot, over long periods of time, than from one device to the next in the same wafer lot. For design evaluation it is advisable to use transistors from several different date codes.

7. BAKER CLAMPS —

Many unanticipated pitfalls can be avoided by using Baker Clamps. MUR105 and MUR1100 diodes are recommended for base drives less than 1 amp. Similarly, MUR405 and MUR4100 types are well-suited for higher drive requirements (see Article Reprint AR131).

OUTLINE DIMENSIONS

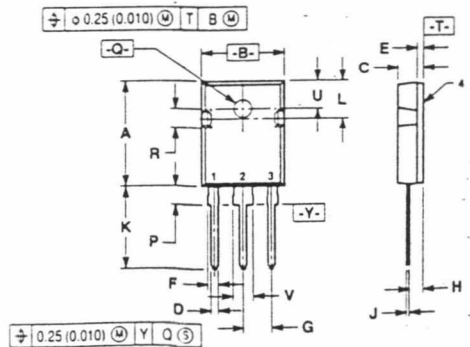


- NOTES:
 1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
 3. ALL RULES AND NOTES ASSOCIATED WITH REFERENCED TO-204AA OUTLINE SHALL APPLY.
 4. 001-05 AND -06 OBSOLETE, NEW STANDARD 001-07.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	29.37 REF	—	1.550 REF	—
B	—	26.67	—	1.050
C	6.35	3.51	0.250	0.335
D	0.97	1.09	0.038	0.043
E	1.40	1.77	0.055	0.070
G	10.92 BSC	—	0.430 BSC	—
H	5.48 BSC	—	0.215 BSC	—
K	11.18	12.19	0.440	0.480
L	16.89 BSC	—	0.665 BSC	—
N	—	21.08	—	0.830
Q	3.84	4.19	0.151	0.165
U	30.15 BSC	—	1.187 BSC	—
V	3.33	4.77	0.131	0.188

STYLE 1:
 PIN 1: BASE
 2: EMITTER
 CASE: COLLECTOR

CASE 1-07
 TO-204AA
 MJ16010A



DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	20.40	20.90	0.803	0.823
B	15.44	15.95	0.608	0.628
C	4.70	5.21	0.185	0.205
D	1.09	1.30	0.043	0.051
E	1.85	1.98	0.073	0.078
F	1.80	2.78	0.071	0.109
G	3.45 BSC	—	0.215 BSC	—
N	2.56	3.87	0.101	0.153
J	0.48	0.68	0.019	0.027
K	15.57	16.08	0.613	0.633
L	7.26	7.50	0.286	0.295
P	3.10	3.38	0.122	0.133
Q	1.50	3.70	0.059	0.145
R	3.30	3.90	0.130	0.150
U	5.30 BSC	—	0.209 BSC	—
V	3.05	3.40	0.120	0.134

- NOTES:
 1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
 3. 340F-01 OBSOLETE, NEW STANDARD 340F-02.

STYLE 3:
 PIN 1: BASE
 2: COLLECTOR
 3: EMITTER
 4: COLLECTOR

CASE 340F-02
 TO-247AE
 MJW16010A

ภาคผนวก ๗

FDK

FERRITE CORES
FOR POWER SUPPLY
& TELECOMMUNICATIONS

E.E.CORES.

บริษัท ฮาร์วาร์ดไทย อินดัสเตรียล จำกัด
泰昭富實業股份有限公司
HARVARD THAI INDUSTRIAL CO., LTD.

292/158 ONNUT 16 SUKHUMVIT 77
PRAKHANONG BANGKOK 10250
TEL: 332-4153, 332-7416 FAX: 332-4153.

Fuji Electrochemical Co., Ltd

Introduction to ferrite

"Ferrite" points to the family of oxides containing trivalent iron ions (Fe^{3+}) called ferric ions. The chemical formula for ferrite is $MOFe_2O_3$, where M indicates divalent metallic ions. Ferrite is an ionic bond compound in which oxygen ions and metallic ions are bonded in a geometric pattern, and is generally obtained in a sintered multi-crystal form.

Ferrite features a high electric resistivity, a low specific gravity value, and a superb anti-chemical property, compared to metallic materials. In addition, ferrite can be formed into complex shapes of all sizes.

Ferrite is commonly produced by the following process: First, iron oxide, the main material, is mixed with more than one type of metallic oxides. Second, the mixture is calcined and thoroughly milled, then granulated after binding agents have been added. The powder thus obtained is pressed into various shapes which are then sintered at a temperature range of $1,000^{\circ}C$ to $1,400^{\circ}C$ to produce ferrite products in their complete form.

Ferrite products, with their superior characteristics, enjoy diverse applications. For example:

① Telecommunications

LC filter, loading coil, coupling transformer, oscillator transformer, wide-band transformer, pulse transformer, etc.

② Power transformers

Main transformer, current transformer, drive transformer, choke, EMI filters, etc.

③ Other applications

Magnetic heads, thermosensor, keyboard switch, magnetic sensor, etc.

Terms and definitions

Permeability

1-1. Initial permeability, μ_i

This is the limit value of B/H where H is indefinitely close to zero ($H \rightarrow 0$) at the virgin magnetization curve of a ferromagnetic substance, and is derived by the following equation:

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}$$

Where μ_0 : permeability in vacuum
 H : AC magnetic field strength
 B : AC magnetic flux density

(Note) The essential permeability of a core material is measured using a toroidal core wound with a coil, and is represented by the following equation:

$$\mu_i = \frac{L - L_0}{4\pi N^2} \cdot \frac{\rho_e}{A_e} \cdot 10^7$$

Where L : self-inductance of core including coil (mH)
 L_0 : self-inductance of coil (mH)
 N : number of turns
 A_e : average cross-sectional area of toroidal core (mm²)
 ρ_e : average magnetic path length of toroidal core (mm)

1-2. Effective permeability, μ_e

This is usually defined as the permeability of a core forming a closed circuit where leakage flux is negligibly small.

$$\mu_e = \frac{L}{4\pi N^2} \cdot \frac{\rho_e}{A_e} \cdot 10^7$$

Where L : self-inductance of core with coil (mH)
 N : number of turns

$$\frac{\rho_e}{A_e} = C_1 = \text{core factor (mm}^{-1}\text{)}$$

1-3. Apparent effective permeability, μ_{app}

This is generally a ratio of two inductances in a closed circuit:

$$\mu_{app} = \frac{L}{L_0}$$

Where L : self-inductance of coil including core
 L_0 : self-inductance of coil not including core

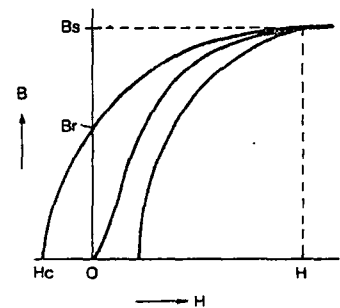
Magnetization curves

2-1. Saturation magnetic flux density, B_s

When the strength of a DC magnetic field H is intensified around a completely demagnetized magnetic core, the magnetic flux density B

increases from the initial point "0" as shown in the figure on the right.

This is called an initial magnetization curve. The magnetic flux density eventually reaches its upper limit, called the saturation magnetic flux density B_s , where the value of B is defined as B_{10} when $H = 10$ Oe.



2-2. Residual magnetic flux density, Br

This is the amount of residual magnetic flux density retained by the core after the DC magnetic field is weakened and finally removed to the level of $H = 0$.

2-3. Coercivity, Hc

This is the strength of the magnetic field whereby the residual flux density becomes zero under the intensification, in the opposite direction, of the DC magnetic field.

3. Loss

3-1. Loss factor $\tan \delta$

The core loss factors of three different types of losses: hysteresis loss, eddy-current loss and residual loss.

$$\begin{aligned}\tan \delta &= \tan \delta_h + \tan \delta_e + \tan \delta_r \\ &= h_1 \sqrt{\frac{L}{V}} + e_1 \cdot f + r_1\end{aligned}$$

The loss coefficient $\tan \delta$ can be also represented by the ratio of resistance to reactance as follows:

$$\tan \delta = \frac{R_m}{\omega L} = \frac{R_{eff} - R_w}{\omega L}$$

Where $\tan \delta_h$: hysteresis loss coefficient

$\tan \delta_e$: eddy-current loss coefficient

$\tan \delta_r$: residual loss coefficient

L: self-inductance of core with coil (mH)

v: core volume (m^3)

i: current (A)

h_1 : hysteresis loss coefficient

e_1 : eddy-current loss coefficient

r_1 : residual loss coefficient

f: frequency (Hz)

R_m : resistance of magnetic core (Ω)

R_{eff} : resistance of core and coil (Ω)

R_w : resistance of coil (Ω)

ω : angular velocity (radian/sec.)

(Note) h_1 is expressed as follows:

$$h_1 = \frac{i}{\omega L} \cdot \sqrt{\frac{V}{L}} \cdot \frac{R_2 - R_1}{i_2 - i_1} \times 10^3$$

Where R_1 = resistance for current i_1

R_2 = resistance for current i_2

Terms and definitions

3-2. Relative loss factor $\tan \delta / \mu_i$

This is the amount of loss per unit permeability and is expressed as follows:

$$\tan \delta / \mu_i \text{ (for magnetic materials)}$$

$$\tan \delta / \mu_e \text{ (where gaps are added to the magnetic circuit)}$$

3-3. Relative hysteresis loss coefficient, h_{10} (h-one-zero)

This is the value of h_1 when $\mu_i = 1000$ and is used for comparing different materials. It is expressed as:

$$h_{10} = h_1 \cdot \left(\frac{1000}{\mu_i} \right)^{1/2}$$

(Note) The relationship between h_{10} and η_B is represented as follows:

$$h_{10} = 50.1 \eta_B \times 10^3$$

3-4. Quality factor, Q

This is the reciprocal of the loss coefficient and is given by:

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{\omega L}{R_m}$$

(Note) The Q for the coil with the core is expressed as follows:

$$Q_e = \frac{\omega L}{R_{eff}}$$

Temperature characteristics

4-1. Temperature coefficient, $\alpha \mu$

This is the fractional difference of permeability per 1°C in a temperature range of from T_1 to T_2 .

$$\alpha \mu = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1}$$

Where μ_1 : permeability at temperature T_1

μ_2 : permeability at temperature T_2

4-2. Relative temperature coefficient, $\alpha \mu r$

This is the temperature coefficient per unit permeability and is represented by:

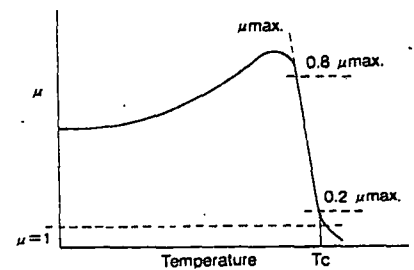
$$\alpha \mu r = \frac{\alpha \mu}{\mu_i}$$

Thus, the temperature coefficient of an actual core is obtained as follows:

$$\alpha \mu = \alpha \mu r \times \mu_e$$

4-3. Curie point, T_c

As shown by the typical temperature characteristic of permeability in the figure on the right, the Curie point T_c is defined as the temperature at which the magnetic core changes from the ferromagnetic to the paramagnetic state. It is the temperature obtained at the intersection point of the horizontal line of $\mu = 1$ and the line passing through the points $0.8 \mu_{max}$ and $0.2 \mu_{max}$.



5. Disaccommodation factor, DF

This is the factor representing the variation of permeability through time after a complete demagnetization of the core at a constant temperature

$$DF = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\log \frac{t_2}{t_1}} \cdot \frac{1}{\mu_1^2} \quad (t_2 > t_1)$$

Where μ_1 : initial permeability t_1 minutes after complete demagnetization

μ_2 : initial permeability t_2 minutes after complete demagnetization

(Note) Generally, t_1 to t_2 is set at 10 to 100 minutes.

6. Electrical resistivity, ρ (Ω -m)

This is the electrical resistance per unit length and cross-sectional area of a magnetic core.

7. Density, d (kg/m^3)

This is the weight per unit volume of a magnetic core as expressed below

$$d = \frac{W}{V}$$

Where W : weight of magnetic body (kg)

V : volume of magnetic body (m^3)

8. Power loss

Power loss denotes the loss by an electrical transformer, such as a switching regulator, under a magnetization condition featuring a high frequency and a large amplitude. Operating magnetic flux density, B , is generally expressed as follows:

$$B = \frac{E}{4.44 f N A_e} \times 10^8 \quad (\text{mT})$$

Where B : magnetic flux density (mT)

E : coil terminal voltage (V)

f : frequency (kHz)

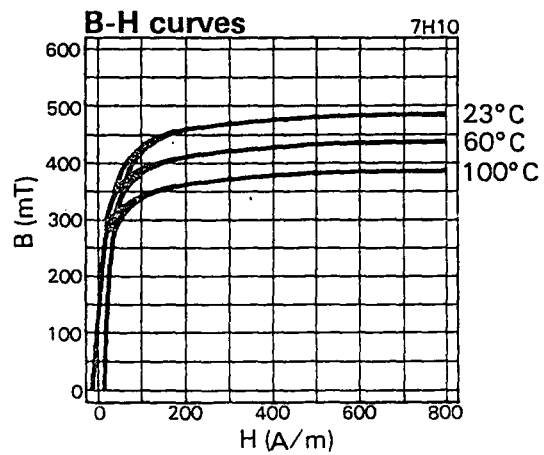
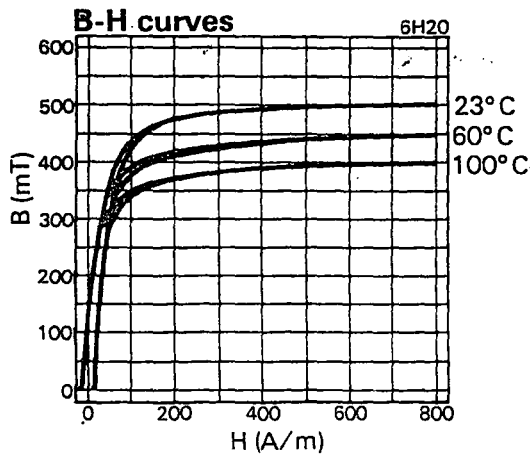
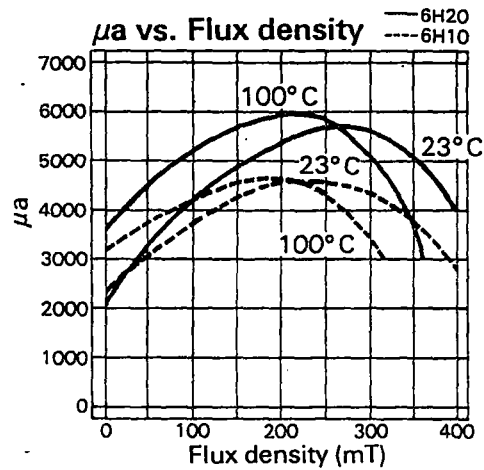
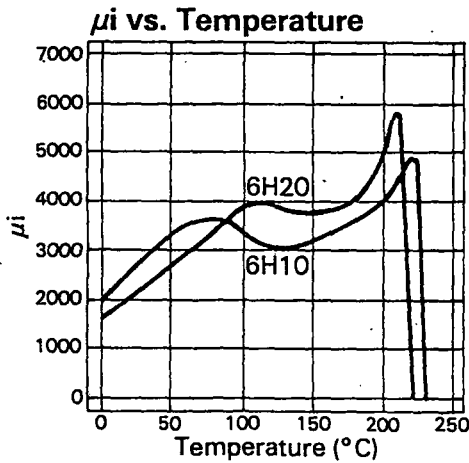
N : number of coil turns

A_e : effective cross-sectional area (mm^2)

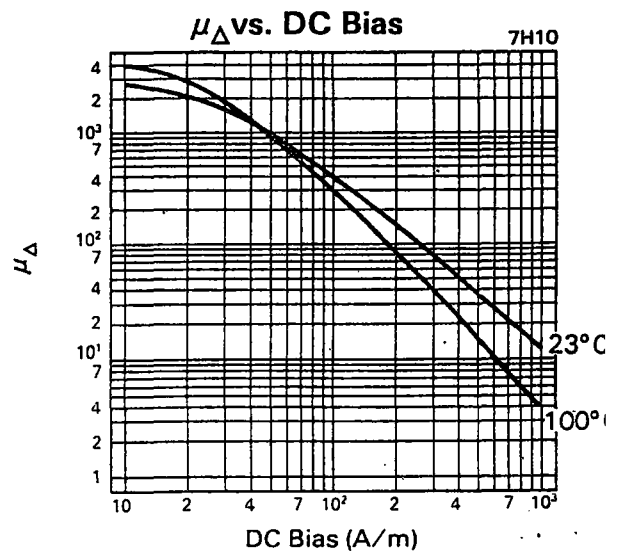
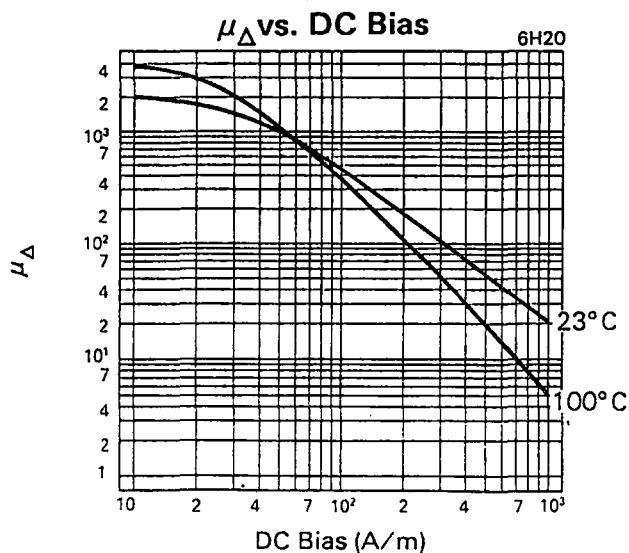
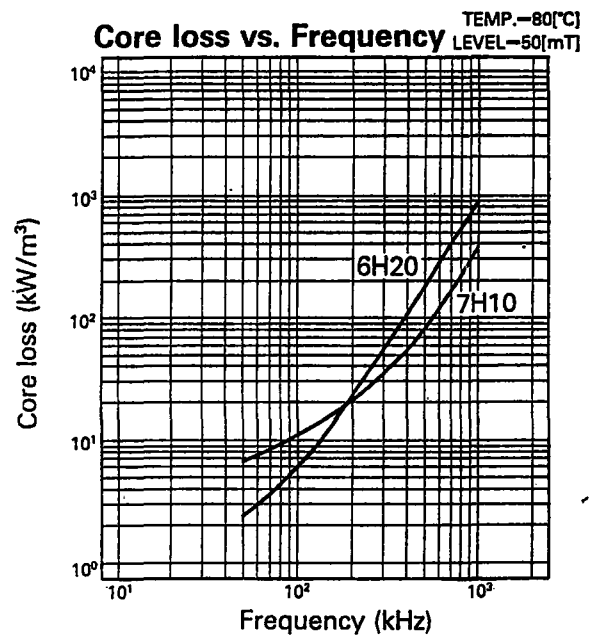
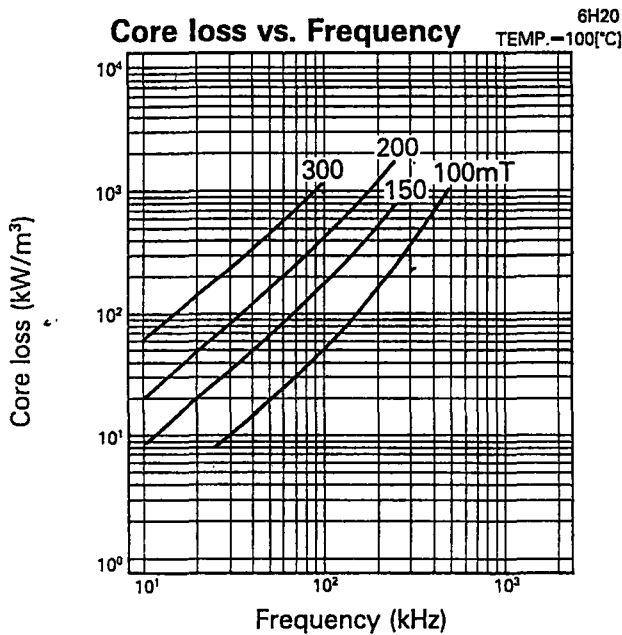
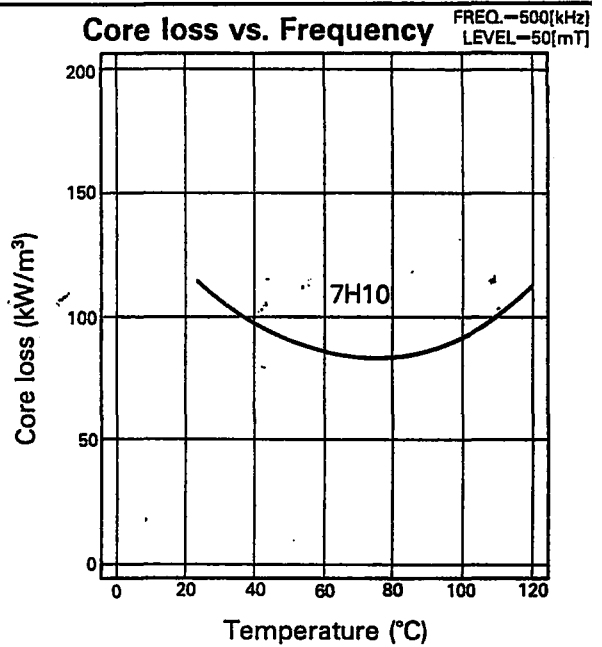
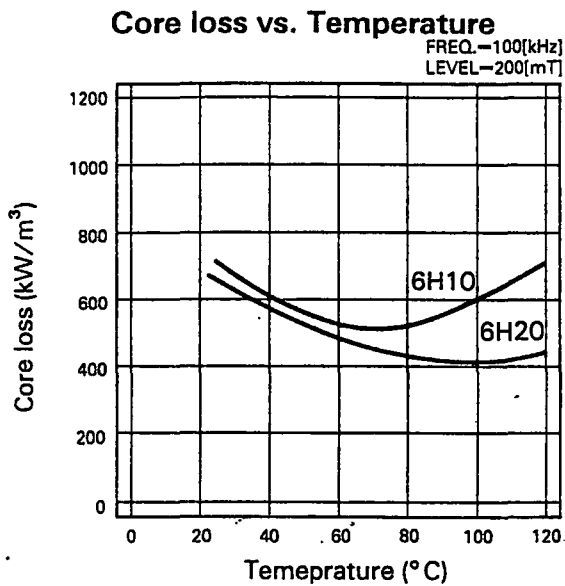
Standard material characteristics (Power material)

Property	Symbol	Condition	Unit	6H10	6H20	7H10	
Initial permeability	μ_{ic}			2500±20%	2300±20%	1500±20%	
Saturation magnetic flux density	Bs (800A/m)	23°C	mT	510	510	480	
		100°C		390	390	380	
Residual magnetic flux density	Br	23°C	mT	110	130	150	
Coercivity	Hc	23°C	A/m	13	13	30	
Relative loss factor	tan δ/μ_{ic}	100kHz	$\times 10^{-6}$	< 5	< 5	< 5	
		60°C		80	80	—	
Core loss	200mT	25kHz	kW/m ³	60°C	80	—	
				80°C	80	65	—
				100°C	110	55	—
		100kHz		60°C	500	500	—
				80°C	500	420	—
				100°C	600	400	—
	50mT	500kHz	kW/m ³	60°C	—	—	100
				80°C	—	—	80
				100°C	—	—	100
		1MHz		60°C	—	—	400
				80°C	—	—	400
				100°C	—	—	500
Temperature coefficient	α_{μ}	20~80°C	$\times 10^{-6}$	8	8	8	
Curie temperature	Tc	—	°C	> 200	> 200	> 200	
Resistivity	ρ	—	$\Omega \cdot m$	3	3	5	
Density	d	—	kg/m ³ $\times 10^3$	4.8	4.8	4.8	

- Note: 1) The values were obtained with toroidal cores (FR25/15/5).
 2) The values were obtained at 23±2°C unless otherwise specified.
 3) Initial permeability was measured at 10kHz, 0.8A/m.



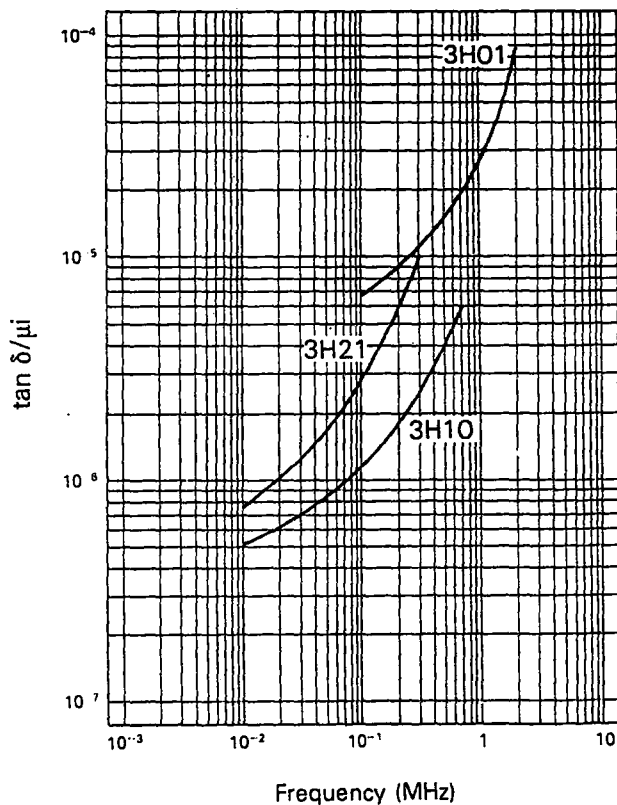
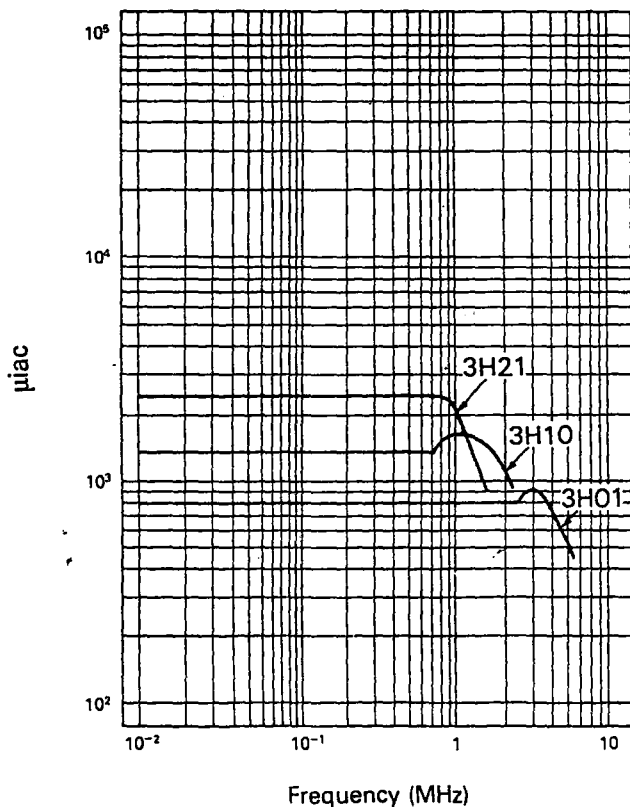
Material characteristic curves (Power material)



Standard material characteristics (Linear material)

Property	Symbol	Unit	3H01	3H10	3H20	3H21	
Initial permeability	μ_{iac}		800 $\pm 20\%$	1200 $\pm 20\%$	2200 $\pm 20\%$	2400 $\pm 20\%$	
Relative loss factor	$\frac{\tan \delta}{\mu}$	$\times 10^{-6}$	< 20 (0.5MHz) < 40 (1MHz)	< 1.5 (0.1MHz) < 4 (0.5MHz)	< 2.5 (0.1MHz)	< 3.5 (0.1MHz)	
Temperature coefficient	-30 to 20°C	α_{μ}	$\times 10^{-3}$	0 to 2	0.3 to 2	0.4 to 1.6	0.4 to 2
	20 to 55°C			0 to 2	0.2 to 1	0.4 to 1.2	0.4 to 2
	20 to 70°C			0 to 2	0.2 to 1	0.4 to 1.2	0.4 to 2
Saturation magnetic flux density	Bs	Gauss	3900	4650	4200	4100	
		mT	390	465	420	410	
Residual magnetic flux density	Br	Gauss	1700	1500	800	1100	
		mT	170	150	80	110	
Coercivity	Hc	Oe	0.7	0.5	0.15	0.3	
		A/m	56	40	12	24	
Hysteresis material constant	η_B	$\frac{\times 10^{-6}}{mT}$	< 1.8 (10kHz)	< 0.4 (100kHz)	< 0.4 (10kHz)	< 0.6 (10kHz)	
Disaccommodation factor	DF	$\times 10^{-6}$	< 20	< 4	< 2	< 3	
Curie temperature	Tc	°C	> 250	> 200	> 160	> 160	
Resistivity	ρ	$\Omega \cdot m$	5	5	5	4	
Density	d	$kg/m^3 \times 10^3$	4.6	4.7	4.8	4.8	

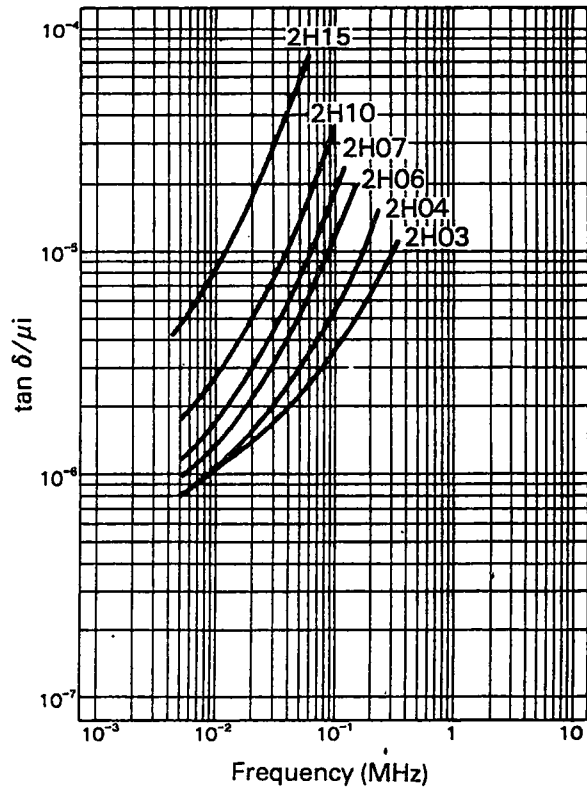
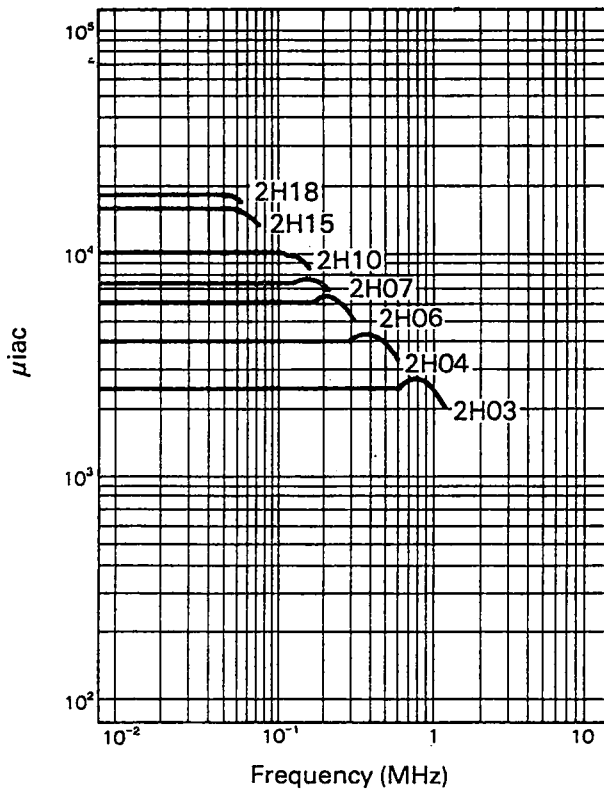
- Note: 1) The values were obtained with toroidal cores (FR25/15/5).
 2) The values were obtained at $23 \pm 2^\circ C$ unless otherwise specified.
 3) Initial permeability was measured at 10kHz, 0.8A/m.



Standard material characteristics (Linear material)

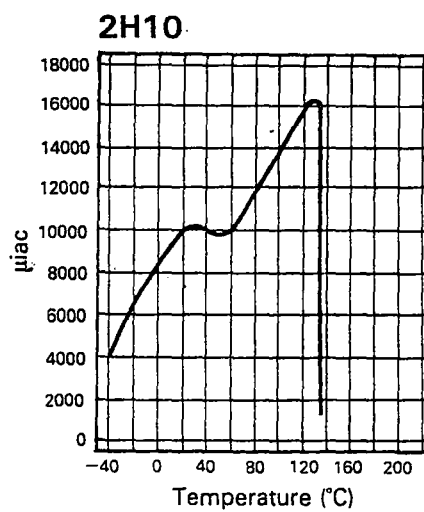
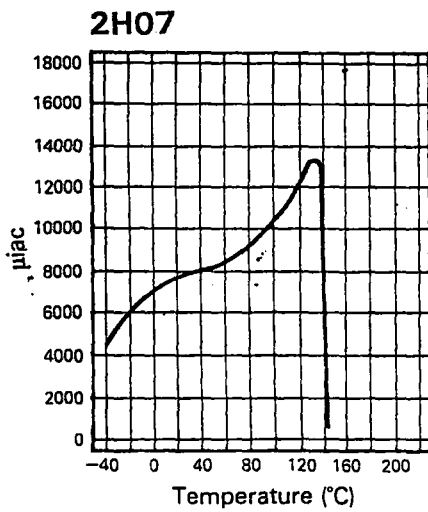
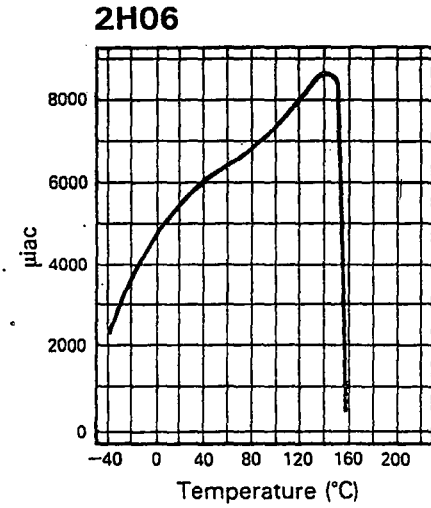
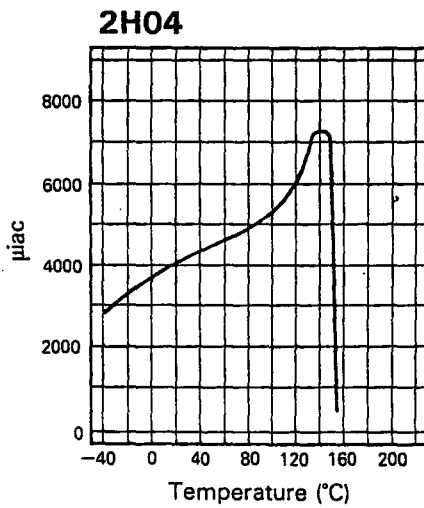
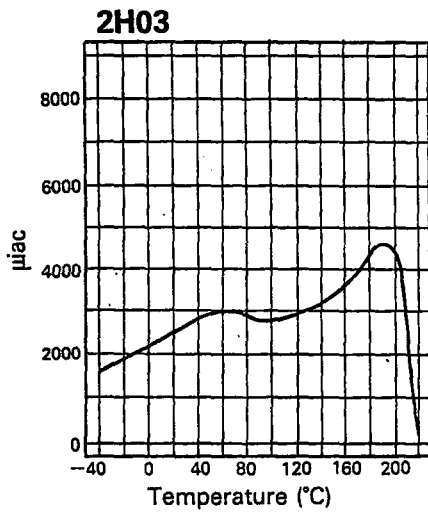
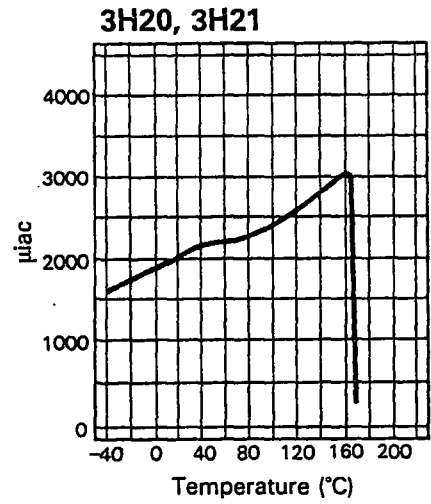
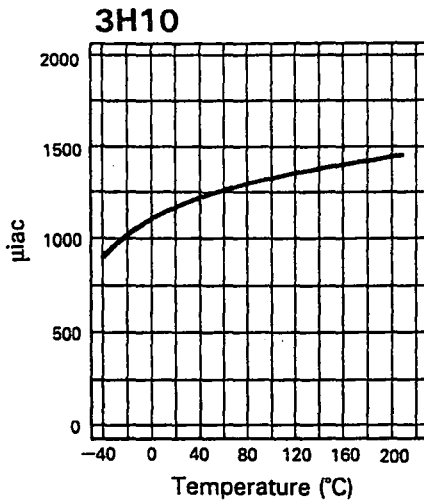
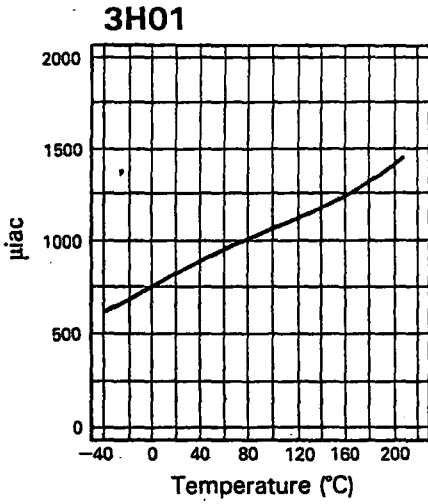
Property	Symbol	Unit	2H03	2H04	2H06	2H07	2H10	2H15	2H18
Initial permeability	μ_{iac}		2500 ±20%	4000 ±20%	5500 ±20%	7500 ±25%	10000 ±30%	15000 ±30%	18000 ±30%
Relative loss factor	$\frac{\tan \delta}{\mu}$	$\times 10^{-6}$	< 4 (100kHz)	< 10 (100kHz)	< 30 (100kHz)	< 5 (10kHz)	< 7.0 (10kHz)	< 15 (10kHz)	< 90 (10kHz)
Temperature coefficient	-30 to 20°C	$\alpha_{\mu r}$	$\times 10^{-6}$		0 to 2.0	0 to 2.0	0 to 2.0	0 to 1.5	0 to 1.5
	20 to 55°C				0 to 2.0	0 to 2.0	0 to 2.0	-0.5 to 1.5	-0.5 to 1.5
	20 to 70°C				0 to 2.0	0 to 2.0	0 to 2.0	-0.5 to 1.5	-0.5 to 1.5
Saturation magnetic flux density	Bs	Gauss	4700	4200	4200	4100	4000	4000	4000
		mT	470	420	420	410	400	400	400
Residual magnetic flux density	Br	Gauss	1000	800	800	600	600	600	800
		mT	100	80	80	60	60	60	80
Coercivity	Hc	Oe	0.16	0.10	0.10	0.05	0.025	0.02	0.02
		A/m	12.8	8	8	4	2	1.6	1.6
Hysteresis material constant	η_B	$\frac{\times 10^{-6}}{\text{mT}}$		< 0.8 (10kHz)	< 0.8 (10kHz)	< 0.6 (10kHz)	< 1.0 (10kHz)	< 2.0 (10kHz)	< 2.0 (10kHz)
Disaccommodation factor	DF	$\times 10^{-6}$		< 3.0	< 3.0	< 3.0	< 2.0	< 1.0	< 1.0
Curie temperature	Tc	°C	> 200	> 140	> 140	> 130	< 120	< 120	< 120
Resistivity	ρ	$\Omega \cdot \text{m}$	1	1	0.2	0.1	0.01	0.01	0.01
Density	d	$\text{kg/m}^3 \times 10^3$	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	5.0

- Note: 1) The values were obtained with toroidal cores (FR25/15/5).
 2) The values were obtained at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ unless otherwise specified.
 3) Initial permeability was measured at 10kHz, 0.8A/m.

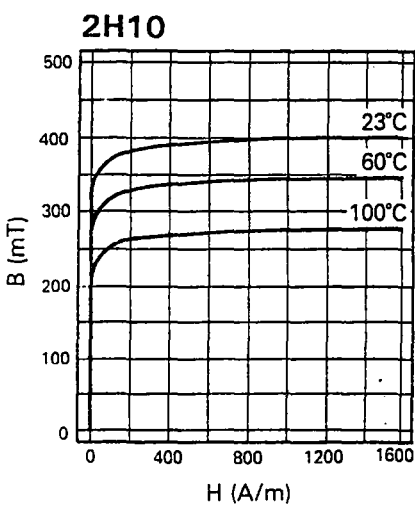
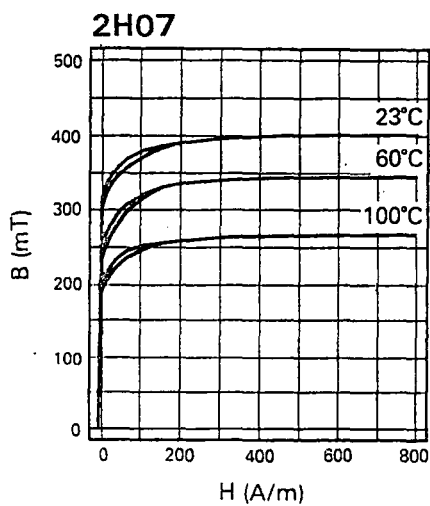
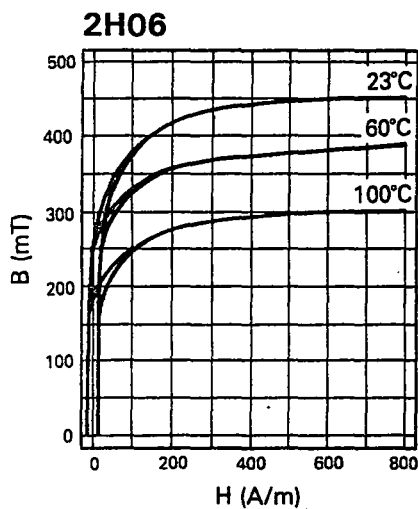
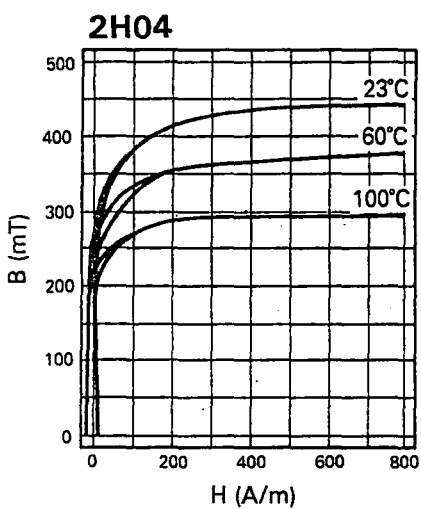
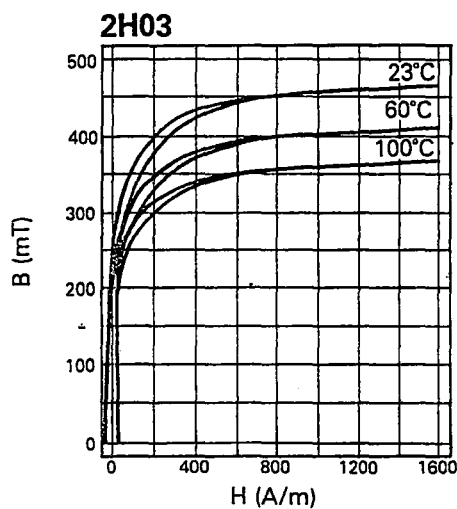
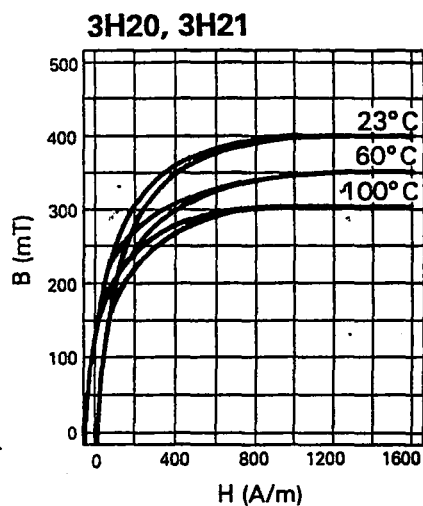
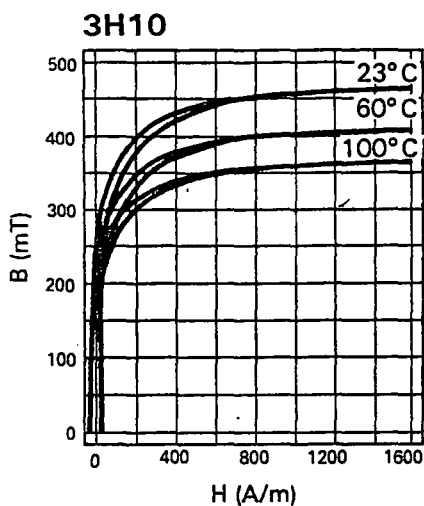
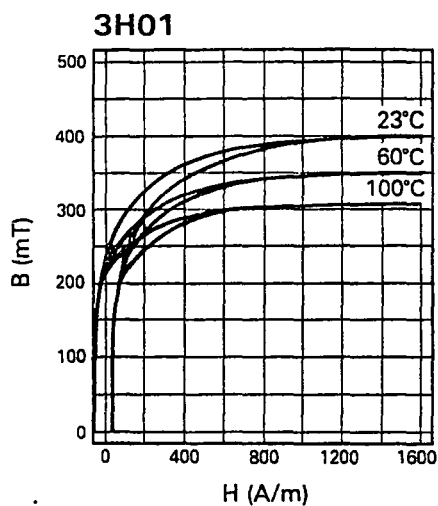


Material characteristics curves

(Linear material)
 μiac vs. temperature

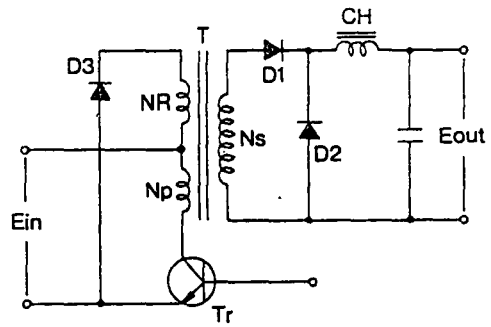


Material characteristics curves (Linear material) B vs



Design methods (Design of transformers for switching mode high frequency power supplies)

Presented here is a design example of a transformer with a forward converter circuit.



List of symbols

P_t	Total loss (W)	N_p	Number of turns at primary side (-)
P_L	Power loss (W)	N_s	Number of turns at secondary side (-)
P_{cu}	Copper loss (W)	NR	Number of resetting turns (-)
$P_{p(cu)}$	Copper loss of primary winding (W)	I_p	Current at primary side (A)
$P_{s(cu)}$	Copper loss of secondary winding (W)	$I_{p(av)}$	Average current at primary side (A)
P_{lo}	Loss by exciting current (W)	I_s	Current at secondary side (A)
P_R	Copper loss of resetting winding (W)	$I_{s(av)}$	Mean current at secondary side (A)
t_m	Working temperature (°C)	I_o	Exciting current (A)
t_{ab}	Ambient temperature (°C)	$I_{o(rms)}$	Effective value of exciting current (A)
Δt	Temperature rise (°C)	I_R	Resetting current (A)
Φ	Magnetic charge (Mx)	$I_{R(rms)}$	Effective value of resetting current (A)
B_s	Saturated magnetic flux density (mT)	r	AC resistance per copper wire 1m ($\Omega m/m$)
B_r	Residual magnetic flux density (mT)	K_1	Temperature compensating coefficient of copper wire resistance value (-)
B_m	Operating magnetic flux density (mT)	AL	Inductance factor (Inductance per turn) (nH/T)
ΔB_m	Changing width of magnetic flux density (mT)	r_p	Winding resistance of primary winding (m Ω)
NI	Electric charge (AT)	r_s	Winding resistance of secondary winding (m Ω)
V_{in}	AC input voltage (V)	r_R	Winding resistance of resetting winding (m Ω)
ΔV_{in}	AC input voltage variation (V)	l	Mean winding length (m)
E_{in}	DC input voltage (V)	l_p	Mean winding length of primary winding (m)
E_{out}	DC output voltage (V)	l_s	Mean winding length of secondary winding (m)
E_s	Output voltage at secondary side of transformer (V)	D_p	Wire diameter of primary winding (m)
V_F	Drop in voltage of commutating diode (V)	D_s	Wire diameter of secondary winding (m)
V_L	Drop in line voltage (V)	D_R	Wire diameter of resetting winding (m)
I_{out}	DC output current (A)	δ	Current density (A/mm ²)
P_{out}	Output power (W)	β	Occupied ratio (-)
f	Switching frequency (Hz)	AW	Bobbin window area (mm ²)
τ_m	Maximum pulse width (μs)	A_e	Effective area (mm ²)
T	Frequency (1/f) (μs)	AW_c	Core window area (mm ²)
τ_m/T	Maximum duty (%)		

1. Example of design

1-1. Setting of condition

$$\begin{aligned} E_{in} &= \sqrt{2} \times V_{in} = 141 \text{ (V)} & f &= 50 \text{ (kHz)} \\ E_{out} &= 5 \text{ (V)} & \tau_m/T &= 40 \text{ (\%)} \\ I_{out} &= 20 \text{ (A)} & t_{ab} &= 50 \text{ (}^\circ\text{C)} \\ \pm \Delta V_{in} &= \pm 15 \text{ (V)} & \Delta t &= 35 \text{ (}^\circ\text{C)} \\ P_{out} &= 100 \text{ (W)} \end{aligned}$$

Where $E_{in} = \sqrt{2} \times V_{in}$: DC input voltage (V)

E_{out} : DC output voltage (V)

I_{out} : DC output current (A)

$\pm \Delta V_{in}$: AC input voltage variation (V)

P_{out} : output power (W)

f : switching frequency (KHz)

τ_m/T : maximum duty (%)

t_{ab} : ambient temperature ($^\circ\text{C}$).

Δt : temperature rise ($^\circ\text{C}$)

1-2. Determination of core size

In order to select cores matching the size and output power of the power supply, see the chart (Fig.-1) for relationships between transmission power and core shape.

EE 40/34K is selected in this design example.

1-3. Derivation of total loss

Derive the value of total loss P_t corresponding to the set value of temperature rise Δt .

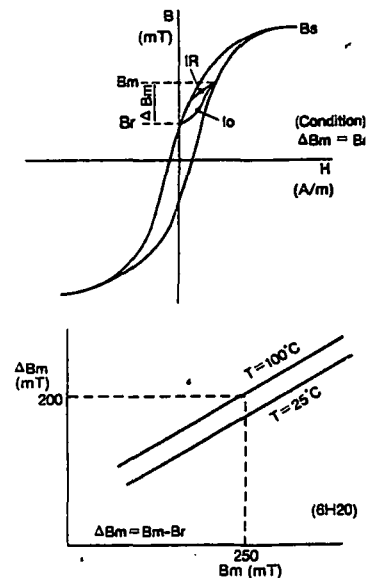
See the graph on (Fig.-2) for relationships between P_t and Δt .

Since Δt is set at 35°C , the graph indicates $P_t = 2.6\text{W}$.

1-4. Changes in magnetic flux

The graph on the right illustrates changes in magnetic flux caused by exciting current I_o in period τ , and that resetting current I_R is generated by resetting magnetic flux in the OFF period. Consequently the transformer will saturate unless the OFF period is set to be greater than the maximum pulse width τ_m . The value of B_m must be set at no more than 80% of the value of B_s to avoid magnetic density saturation.

The graph on the right presents relationships between ΔB_m and B_m .



1-5. Determination of magnetic load

Total loss is generally expressed in the equation,

$$P_t = P_{cu} + PL_f$$

where the optimal condition is reached when $(1/2) P_t = PL_f = P_{cu}$. The permissible value of power loss $PL = (1/0.4) PL_f$ is then estimated with the optimal condition for $(1/2) P_t = PL_f$ at the maximum operating temperature of the core and the utilization rate and duty of the magnetic flux taken into account. Here, 1/0.4 is the coefficient for conversion between iron material loss and the iron loss in a forward converter circuit. Next, the value of B_m is obtained from the graph "Power loss vs. magnetic flux density." Fig.-3. The value of ΔB_m is derived from the above graph " Δ vs. B_m ." For core materials, 6H20 is most suited for the minimization of loss in the operating temperature range of 20°C to 85°C. As a result,

$$PL_f = (1/2) P_t = 1.3W$$

$$PL = (1/0.4) \times 1.3 = 3.25W$$

From the graph "Power loss vs. magnetic flux density," it is found that $PL = 3.25W$ corresponds to $B_m = 250$ mT. Then, from the graph, ΔB is 200 mT.

1-6. Maximum DC input voltage

$$E_{in(max)} = \sqrt{2} \times (V_{in} + \Delta V) = \sqrt{2} \times (100 + 15) \approx 162$$

1-7. Determination of primary winding

$$N_p = \frac{E_{in(max)}}{A_e \times \Delta B_m} \times \tau_m \times 10^3 = \frac{162 \times 8 \times 10^3}{147 \times 200} \approx 44(T)$$

(Condition)

$$\tau_m / T = 40 (\%)$$

$$\text{Therefore, } \tau_m = 8 (\mu s)$$

1-8. Determination of secondary winding

$$E_s = \frac{V_F + V_L + E_{out}}{\tau_m / T} = \frac{1.5 + 5}{0.4} \approx 16(V)$$

(Condition)

$$V_F + V_L = 1.5 (V)$$

$$E_{in(min)} = \sqrt{2} \times (V_{in} - \Delta V) = \sqrt{2} \times (100 - 15) \approx 120(V)$$

$$N_s = \frac{N_p \times E_s}{E_{in(min)}} = \frac{44 \times 16}{120} \approx 6(T)$$

1-9. Average current of primary winding

$$N_p \cdot I_p = N_s \cdot I_s$$

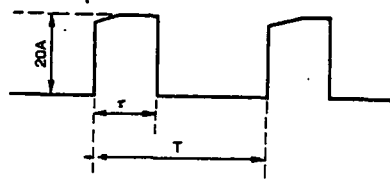
$$\text{therefore, } I_p = \frac{N_s \cdot I_s}{N_p}$$

$$I_p (\text{av}) = I_p \cdot (\tau_m / T) = \frac{N_s \cdot I_s}{N_p} (\tau_m / T) = \frac{6 \times 20 \times 0.4}{44} = 1.1 (\text{A})$$

1-10. Average current of secondary winding

$$I_s (\text{av}) = I_{\text{out}} \cdot (\tau_m / T)$$

The figure below shows the current waveform in the secondary winding.



Accordingly, the average current is :

$$I_s (\text{av}) = 20 \times 0.4 = 8 (\text{A})$$

1-11. Calculation of electric load

Electric load is defined as the total intensity of currents in the coil window area. The current density is equal in each winding.

$$N \cdot I = N_R \cdot I_R (\text{av}) + N_p \cdot I_p (\text{av}) + N_s \cdot I_s (\text{av})$$

Where N_R : number of resetting turns $(-)$ $N_p = N_R$

$I_R (\text{av})$: average resetting current (A) $I_R (\text{av}) \leq I_p (\text{av}) / \sqrt{10}$.

From this condition,

$$N \cdot I = (1/\sqrt{10}) N_p \cdot I_p (\text{av}) + 2N_p \cdot I_p (\text{av})$$

$$= 2.3 (N_p \cdot I_p (\text{av})) = 2.3 \times 44 \times 1.1 = 111 (\text{AT})$$

Where $1/\sqrt{10}$ is the coefficient for converting the value of resetting current into the value of primary winding current.

1-12. Current density of winding

$$\delta = \frac{N \cdot I}{\beta \cdot AW} \quad (2 \leq \delta < 7) \text{ (A/mm}^2\text{)}$$

$$(0.5 \leq \beta < 0.7) \text{ (-)}$$

(Condition) $\beta = 0.5$, $AW \approx 105 \text{ (mm}^2\text{)}$

$$\delta = \frac{111}{0.5 \times 105} \approx 2.1 \text{ (A/mm}^2\text{)}$$

Note : AW is effective when its value is approximately 60 to 70% of the value of AWc. In this example, AW is set at 65% of AWc = 160 mm². (For the EI core, AWc = (B - C) F/2)

1-13. Wire diameter of primary winding

$$D_p \leq \sqrt{\frac{4 \cdot I_p(\text{av})}{\pi \cdot \delta}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.1}{\pi \times 2.1}} \approx 0.82 \text{ (}\phi\text{)}$$

1-14. Wire diameter of secondary winding

$$D_s \leq \sqrt{\frac{4 \cdot I_s(\text{av})}{\pi \cdot \delta}} = \sqrt{\frac{4 \times 8}{\pi \times 2.1}} \approx 2.2 \text{ (}\phi\text{)}$$

In view of the surface skin effect, the safety coefficient for ripple current is set at 1.2. Then, the optimal number of secondary winding wires equals $(N_p/N_s) \times 1.2$, where these wires are wound in parallel and the diameter is the same for both primary and secondary wires. As a result, $(44 \div 6) \times 1.2 \approx 9$ wires each ϕ 0.82 are recommended to be wound in parallel.

1-15. Resistance of primary and secondary windings

Resistance of primary winding

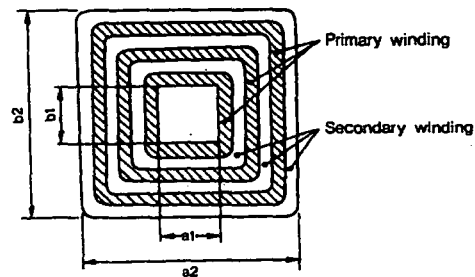
$$r_p = N_p \cdot \ell \cdot p \cdot r$$

Resistance of secondary winding

$$r_s = N_s \cdot \ell \cdot s \cdot r$$

The average winding length is derived as follows:

- (1) Secondary winding incorporated in the primary winding in a sandwich pattern



a1, b1 : inside dimensions of bobbin

a2, b2: outer frame dimensions of bobbin

Average winding length is :

$$l = a1 + b1 + a2 + b2 \text{ or } l = l_s = l_p$$

AC resistance per 1m (at 25°C)

Wire diameter (mm)	AC resistance <i>r</i> (mΩ/m)	
	<i>f</i> = 50KHz	<i>f</i> = 100KHz
0.4	141	143
0.5	91	94
0.6	65	67
0.7	48	51
0.8	38	43
0.9	32	37
1.0	25	31

From bobbin dimensions,

$$a1 = 14.4 \text{ (mm)}$$

$$b1 = 14.4 \text{ (mm)}$$

$$a2 = 26.7 \text{ (mm)}$$

$$b2 = 26.7 \text{ (mm)}$$

When 95% of the bobbin space is used,

$$l = 14.4 + 14.4 + 0.95 (26.7 + 26.7) = 79 \text{ (mm)}$$

From the above table, the AC resistance per meter of a $\phi 0.8$ wire is described as:

$$r = 38 \text{ (m}\Omega\text{/m)}$$

Primary winding resistance r_p is :

$$r_p = 44 \times 0.079 \times 38 \text{ (}\Omega\text{)} \approx 132 \text{ (m}\Omega\text{)}$$

Secondary winding resistance r_s is :

(Nine 0.8 ϕ wires are wound in parallel.)

$$r_s = 6 \times 0.079 \times 38 \div 9 \approx 2 \text{ (m}\Omega\text{)}$$

(2) Primary winding wound inside the secondary winding

When the average winding length of the bobbin is l , the following equations give typical lengths of the secondary and primary windings

$$l_s = l/2 + a2 + b2$$

$$l_p = l/2 + a1 + b1$$

1-16. Copper losses of primary and secondary windings

The temperature compensating coefficient K1 for copper wire resistance is obtained from the table below.

(Copper loss of primary winding)

$$P_p(\text{cu}) = r_p \cdot (I_p)^2 \cdot \frac{\tau_m}{T} \cdot K_1$$

(Copper loss of secondary winding)

$$P_s(\text{cu}) = r_s \cdot (I_s)^2 \cdot \frac{\tau_m}{T} \cdot K_1$$

Temperature compensating coefficients of copper wire resistance

Temperature (°C)	Compensating Coefficient (K1)
20	1.000
50	1.118
55	1.138
60	1.157
65	1.177
70	1.197
75	1.216
80	1.236
85	1.255
90	1.275
95	1.295

If the maximum operating temperature is 85°C, K1 = 1.255.

$$P_p(\text{cu}) = 0.132 \times (2.7)^2 \times 0.4 \times 1.255 \approx 0.483 \text{ (W)}$$

$$P_s(\text{cu}) = 0.002 \times (20)^2 \times 0.4 \times 1.255 \approx 0.402 \text{ (W)}$$

1-17. Loss due to exciting current

Primary inductance Lp is :

$$L_p = AL \cdot (N_p)^2 = 2000 \times 10^{-9} \times (44)^2 \approx 0.00387 \text{ (H)}$$

(Condition) AL = 2000

Exciting current I₀ is :

$$I_0 = \frac{E_{in(\text{min})}}{L_p} \times \tau_m = 120 \times 8 \times 10^{-6} \div 0.00387 \approx 0.25 \text{ (A)}$$

Effective value I₀(rms) of I₀ is :

$$I_0(\text{rms}) = I_0 \div \sqrt{3} = 0.25 / \sqrt{3} \approx 0.14 \text{ (A)}$$

Accordingly, the loss due to exciting current is :

$$P_{I_0} = r_p \cdot (I_0(\text{rms}))^2 \cdot K_1 = 0.132 \times (0.14)^2 \times 1.255 = 0.00325 \text{ (W)}$$

1-18. Copper loss of resetting windings

The number of resetting winding turns $N_R = N_p$ the number of primary winding turns. The diameter of the resetting winding wire D_R is approximately $1/3.16$ of D_p , the diameter of the primary winding wire.

$$D_R = D_p \times (1/3.16) = 0.8 \times (1/3.16) = 0.25 (\phi)$$

The resistance r_R of resetting winding is :

$$r_R = 10 \times r_p = 10 \times 0.132 = 1.32 (\Omega)$$

Accordingly the copper loss of resetting winding D_R is derived from the equation, $I_R (\text{rms}) = I_o (\text{rms})$:

$$P_R = r_R \times (I_o (\text{rms}))^2 \times K_1 = 1.32 \times (0.14)^2 \times 1.255 = 0.0325$$

$$\text{(Condition) } I_o (\text{rms}) = 0.14 (\text{A})$$

1-19. Total copper loss

$$P_{cu} = P_p + P_s + P_{lo} + P_R$$

$$\cong 0.483 + 0.402 + 0.00325 + 0.0325 \cong 0.921 (\text{W})$$

$$\text{(Condition) } P_p \cong 0.483 (\text{W})$$

$$P_s \cong 0.402 (\text{W})$$

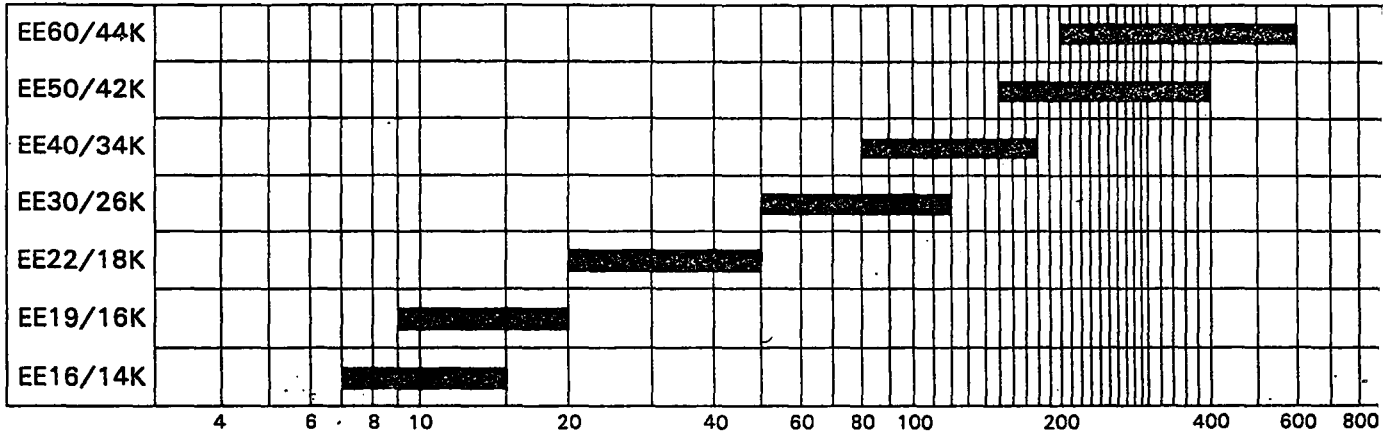
$$P_{lo} \cong 0.00325 (\text{W})$$

$$P_R \cong 0.0325 (\text{W})$$

1-20. Evaluation of design values

Evaluation is made to see if the initial conditions are satisfied. This evaluation is made on the basis of power loss $PL_f = 1.3\text{W}$ and copper loss $P_{cu} = 0.92\text{W}$, and thus the designed transformer would have a total loss of 2.22W , a value less than the initially set 2.6W . Accordingly, the designing can be said to be workable. If the initial conditions were not satisfied, it would be necessary to re-examine the operating flux density B_m , core material characteristics, core size and the transformer radiation method, among others.

Fig.-1



(Notes) A slight change takes place therein depending on the loss of core, winding, shape and winding method bobbi
Therefore, utilize only as a rough reference.

Fig.-2

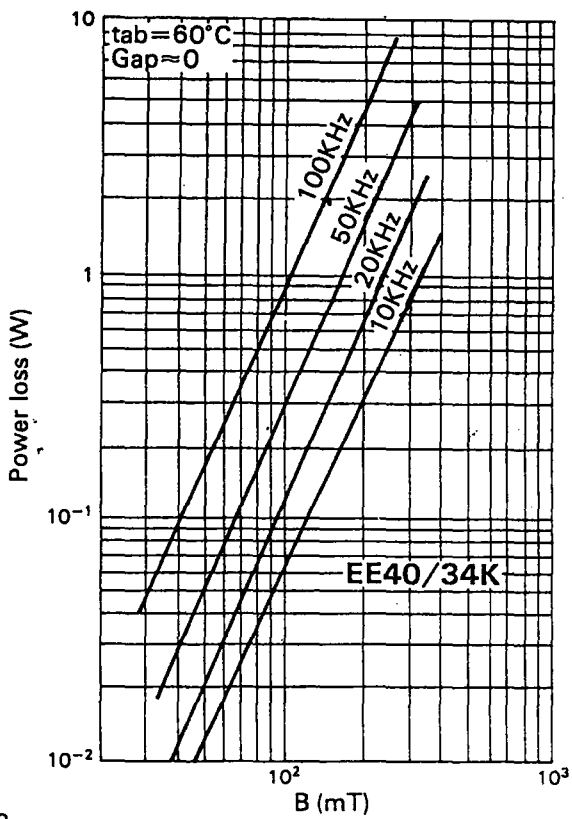
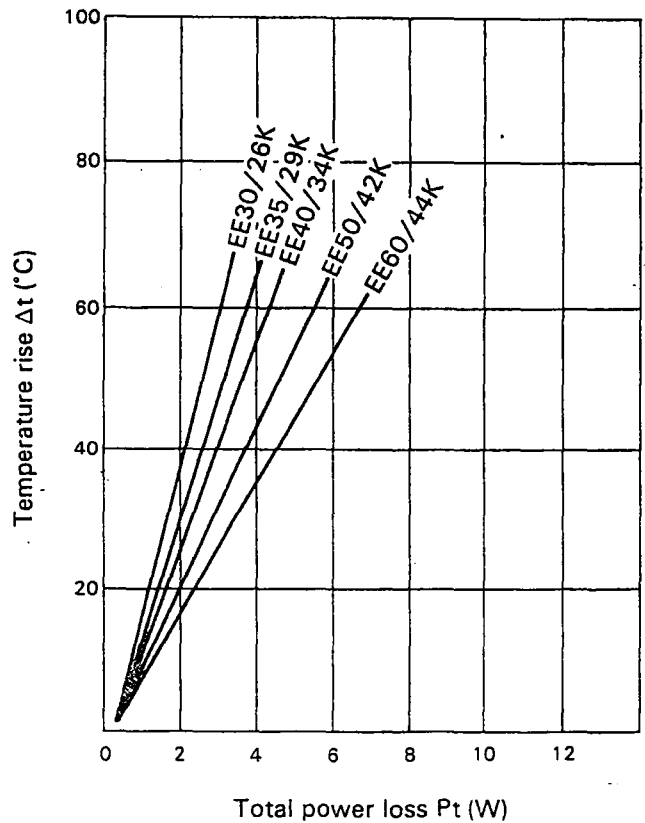
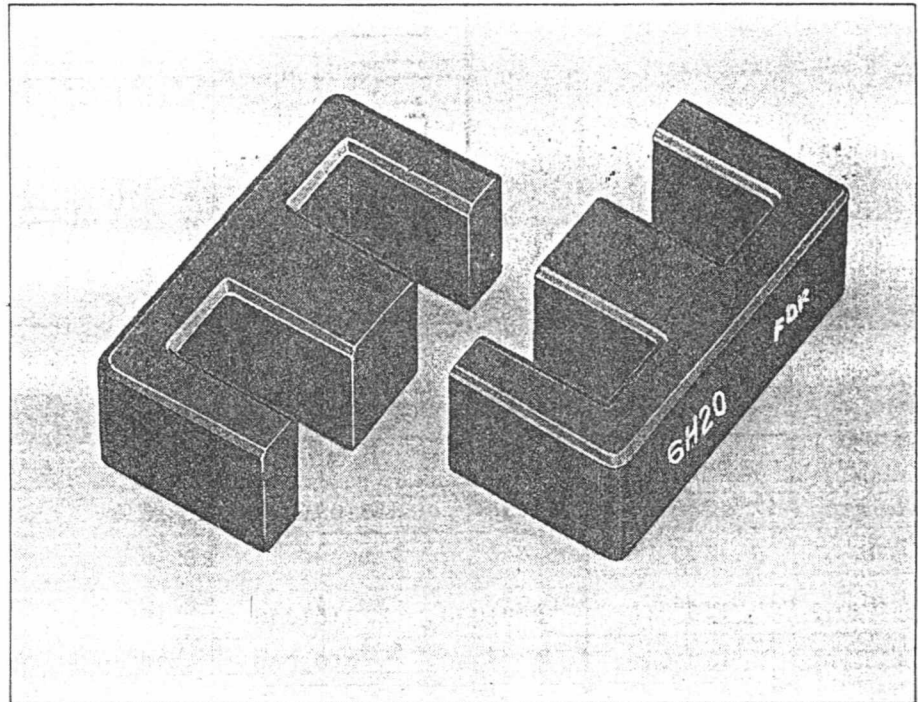


Fig.-3



EE CORES



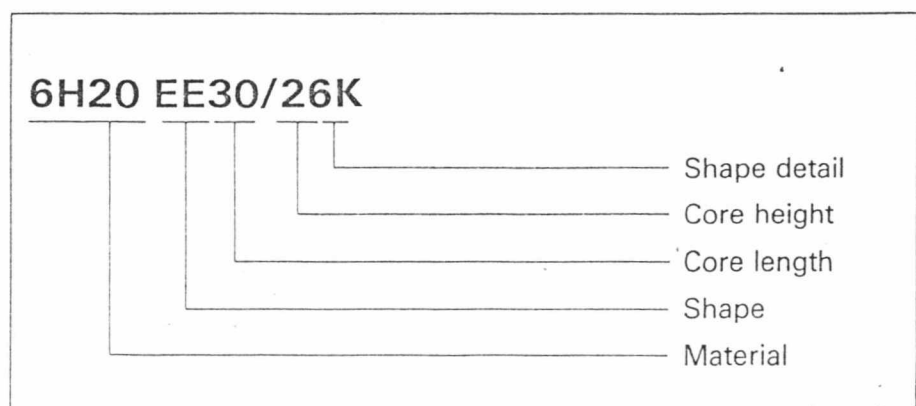
Features

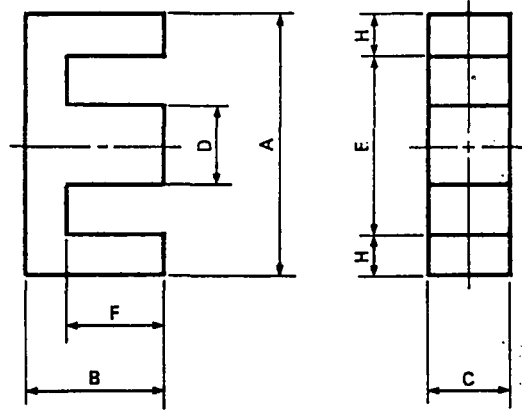
- ① Customers are invited to select the most suitable products from a wide selection of shapes.
- ② Various types of bobbins with pins are available.

Applications

Switching regulators, choke coils, transformers for strobo use, pulse transformers, etc.

Designation



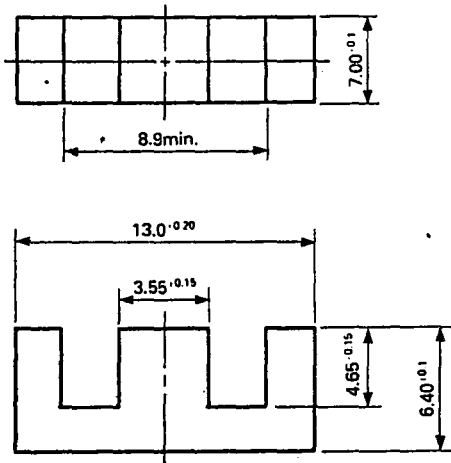


Shape code	Dimensions (mm)							General standard
	A	B	C	D	E _{min.}	F	H	
EE12.6/13	12.6±0.50	6.40±0.10	3.55±0.15	3.55±0.15	8.9	4.65±0.15	1.70	
EE13/13B	13.0±0.20	6.40±0.10	7.00±0.10	3.55±0.15	8.9	4.65±0.15	1.90	
EE16/14K	16.0±0.30	7.20±0.10	4.80±0.20	3.80±0.20	11.7	5.20±0.15	2.00	JIS
EE19/16K	19.1±0.30	7.95±0.15	5.00±0.20	4.55±0.15	14.2	5.60±0.10	2.30	JIS
EE19/16Z	19.3±0.32	8.10±0.18	4.76±0.13	4.76±0.08	14.1	5.72±0.13	2.38	
EE22/20	22.0±0.30	10.2±0.20	5.75±0.25	4.25±0.25	17.0	7.70±0.20	2.25	
EE25/19A	25.8±0.40	9.65±0.13	6.35±0.20	6.48±0.13	18.8	6.73±0.25	3.30	
EE25/19Z	25.4±0.38	9.53±0.25	6.35±0.25	6.35±0.13	18.7	6.38±0.17	3.18	JIS
EE25/20	25.0±0.30	10.2±0.20	6.40±0.30	6.40±0.30	18.2	6.65±0.15	3.25	
EE30/26K	30.0±0.50	13.2±0.20	10.7±0.30	10.7±0.30	19.5	8.15±0.15	5.00	JIS
EE30/30	30.0±0.50	14.9±0.25	6.90±0.30	6.90±0.20	19.5	10.2±0.25	5.00	
EE34/28A	34.6±0.45	14.2±0.20	9.27±0.25	9.27±0.25	25.4	9.90±0.25	4.38	
EE40/34B	40.0±0.60	16.8±0.40	11.7±0.40	11.7±0.40	26.8	10.7±0.15	6.35	
EE40/34K	40.0±0.50	17.0±0.30	10.7±0.30	10.7±0.30	27.4	10.3±0.30	6.00	JIS
EE40/35A	40.8±0.55	16.6±0.25	12.4±0.30	12.5±0.30	28.6	10.7±0.28	5.85	
EE40/44	40.1±0.60	22.3±0.30	11.7±0.40	11.7±0.40	27.3	15.2±0.20	6.05	
EE42/42-15W	42.2±0.90	21.0±0.20	15.0±0.30	12.0±0.30	29.5	15.2±0.40	6.03	JIS
EE42/42-20W	42.2±0.90	21.0±0.20	19.6±0.40	12.0±0.30	29.5	15.2±0.40	6.03	JIS
EE43/34	42.6±0.85	17.0±0.30	12.6±0.40	12.6±0.30	28.1	10.5±0.30	6.86	
EE47/39A	47.2±0.60	19.6±0.30	15.5±0.40	15.7±0.35	31.8	12.4±0.35	7.44	
EE50/42K	50.0±0.70	21.3±0.30	14.6±0.40	14.6±0.40	34.2	12.8±0.30	7.50	JIS
EE55/55A	55.2±1.10	27.5±0.30	20.7±0.30	17.0±0.30	37.5	18.9±0.40	8.52	JIS
EE56/47A	56.6±0.65	23.6±0.30	18.7±0.45	18.8±0.25	38.1	14.8±0.35	9.02	
EE80/76	80.0±1.00	38.1±0.40	19.8±0.40	19.8±0.40	61.2	28.2±0.30	8.90	

EE CORES

Shape code	Magnetic parameter				Center leg area A_c (mm ²)	Minimum cross sectional area A_{min} (mm ²)		Window area A_w (mm ²)	Approx. weight (g/pr.)	Test data (page)	Bobbin (page)
	C_1 (mm ⁻¹)	A_o (mm ²)	l_o (mm)	V_o (mm ³)							
EE12.6/13	2.4057	12.4	29.7	367	12.6	12.1	L	26.3	1.90	—	—
EE13/13B	1.1934	25.1	30.0	752	24.9	23.8	B	26.6	3.70	47	—
EE16/14K	1.8662	18.9	35.2	663	18.2	18.2	C	42.6	3.20	48	59
EE19/16K	1.7168	23.1	39.6	915	22.8	22.8	C	55.7	4.58	49	—
EE19/16Z	1.7715	22.7	40.1	909	22.7	22.7	LBC	55.9	4.56	—	—
EE22/20	1.9594	26.1	51.2	1340	24.4	24.4	C	102	13.8	—	—
EE25/19A	1.2387	39.8	49.2	1960	41.1	37.1	B	85.6	9.96	—	—
EE25/19Z	1.1970	40.2	48.1	1940	40.3	40.0	B	81.0	10.3	50	—
EE25/20	1.1561	42.6	49.3	2100	41.0	41.0	C	80.5	10.3	—	—
EE30/26K	0.52756	110	57.9	6360	114	107	L	75.8	32.2	51	59
EE30/30	1.1538	57.3	66.1	3790	47.6	47.6	C	134	20.7	52	—
EE34/28A	0.85153	82.1	69.9	5750	85.9	79.7	B	164	29.5	—	—
EE40/34B	0.54389	142	77.5	11000	137	137	C	167	52.0	53	—
EE40/34K	0.60782	127	77.4	9860	114	114	C	178	52.0	54	60
EE40/35A	0.52569	149	78.1	11600	155	145	L	178	58.8	—	—
EE40/44	0.66917	145	97.2	14100	137	137	C	248	71.7	—	—
EE42/42-15W	0.54243	180	97.8	17600	180	180	BC	276	86.9	55	—
EE42/42-20W	0.41512	236	97.8	23000	235	235	BC	276	118	56	—
EE43/34	0.47780	165	78.7	13000	159	159	C	171	65.0	—	—
EE47/39A	0.38524	232	89.5	20800	243	223	B	206	106	—	—
EE50/42K	0.42677	226	96.3	21700	213	213	C	261	113	57	60
EE55/55A	0.34989	353	124	43700	352	352	C	400	218	58	—
EE56/47A	0.31597	339	107	36400	352	329	B	292	186	—	—
EE80/76	0.49137	377	185	69700	392	352	L	1480	354	—	—

ote: Minimum cross sectional area B; Back area C; Center leg area L; Side leg area



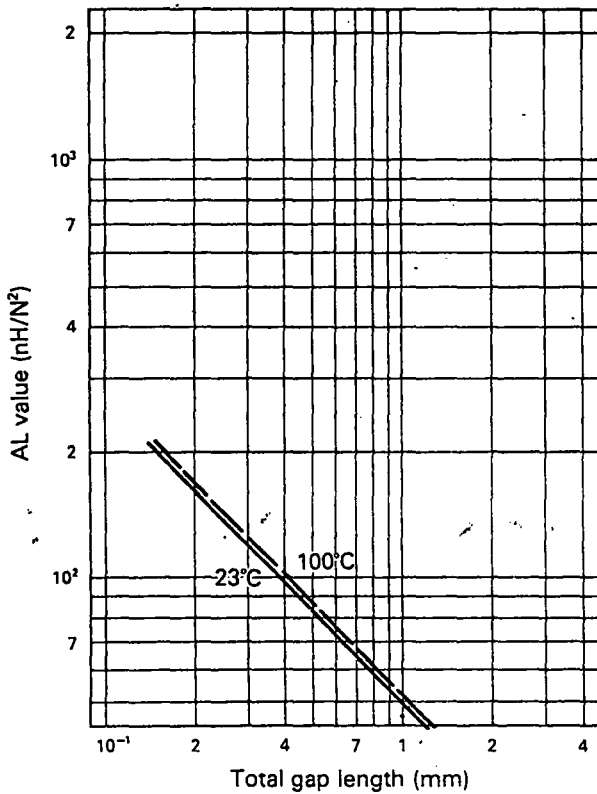
Magnetic Parameter

Core constant	C_1	1.1934 mm ⁻¹
Effective magnetic pass length	ℓ_e	30.0 mm
Effective cross sectional area	A_e	25.1 mm ²
Effective core volume	V_e	752 mm ³
Center leg area	A_c	24.9 mm ²
Minimum cross sectional area (Back area)	A_{min}	23.8 mm ²
Winding area of core	A_w	26.6 mm ²
Approx. Weight		3.70 g/pair

Unit: mm

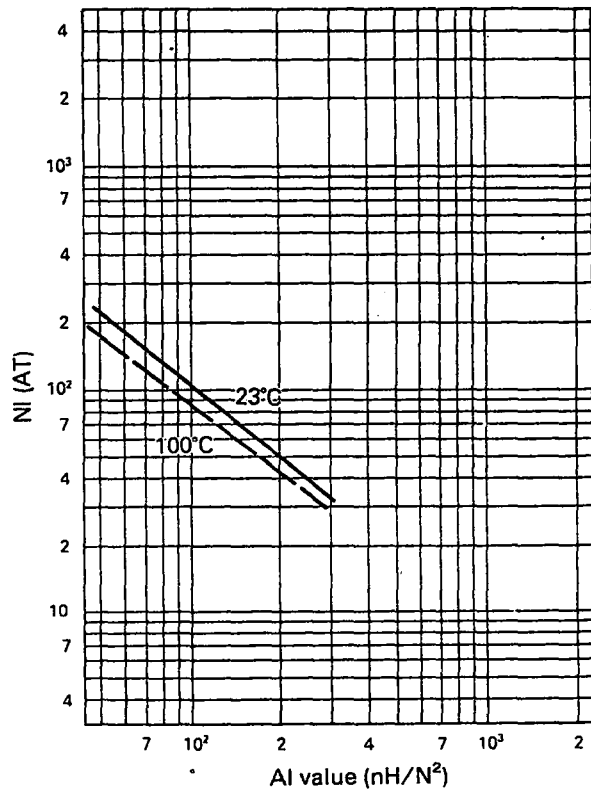
Product code	AL Value (nH/N ²)	Effective permeability μ_e	Air gap approx.	Core loss (Max.) 100kHz, 200mT (Watt)
6H20 EE13/13B	1,700 ±25% (1,275~2,125)	1,580	0	0.38

AL value vs. gap length

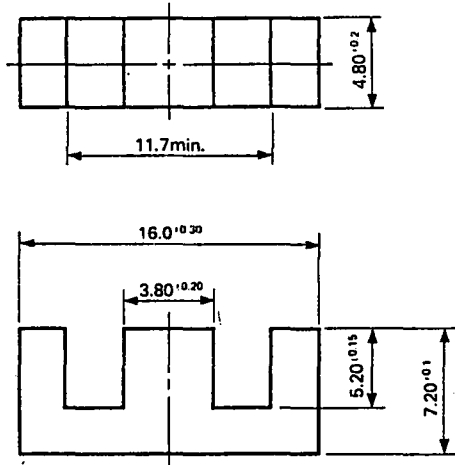


23°C AL = 52.0 × G^{-0.72937} (nH/N²)
 G = 225.7 × AL^{-1.37103} (mm)
 100°C AL = 52.5 × G^{-0.74028} (nH/N²)
 G = 211.1 × AL^{-1.35083} (mm)

NI vs. AL value



NI shows the point where the exciting current is 20% away from its extended linear part.



Magnetic Parameter

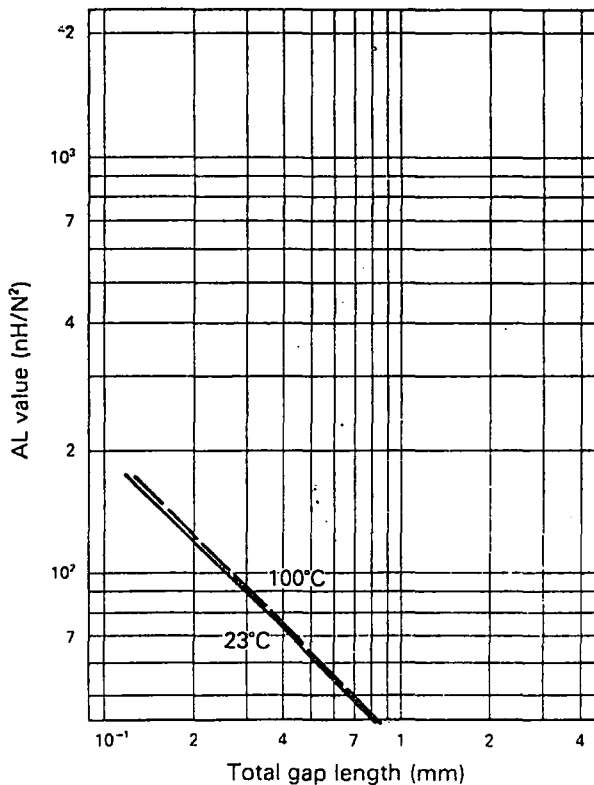
Core constant	C_1	1.8662 mm ⁻¹
Effective magnetic pass length	ℓ_e	35.2 mm
Effective cross sectional area	A_e	18.9 mm ²
Effective core volume	V_e	663 mm ³
Center leg area	A_c	18.2 mm ²
Minimum cross sectional area (Center leg)	A_{min}	18.2 mm ²
Winding area of core	A_w	42.6 mm ²

Approx. Weight 3.20 g/pair

Unit: mm

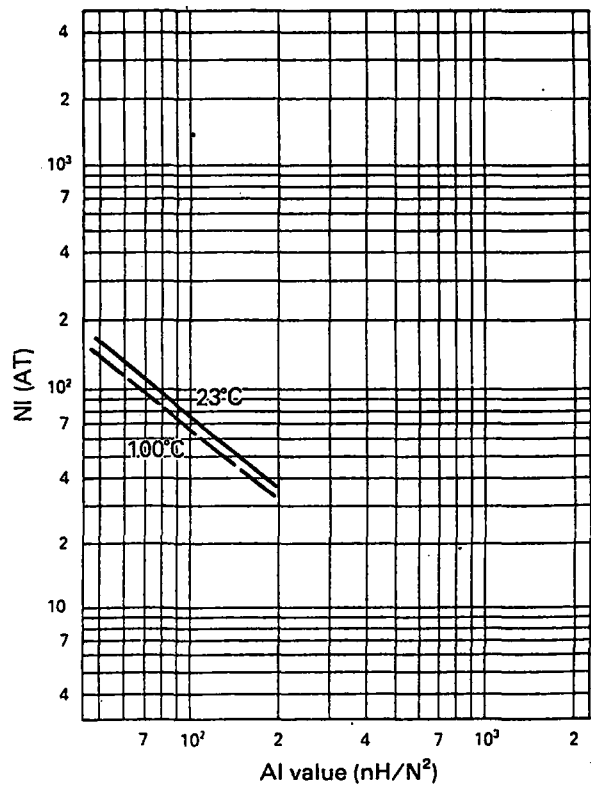
Product code	AL Value (nH/N ²)	Effective permeability μ_e	Air gap approx.	Core loss (Max.) 100kHz, 200mT (Watt)
6H20 EE16/14K	1,100 ± 25% (825-1,375)	1,630	0	0.34

AL value vs. gap length

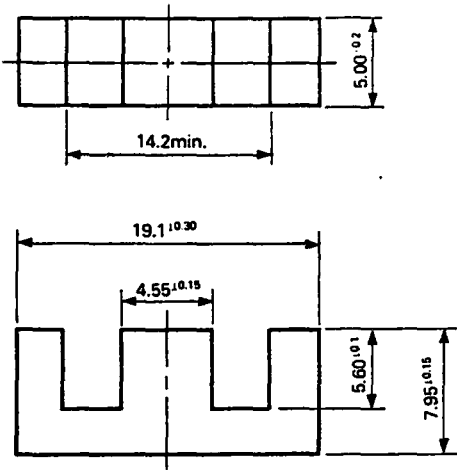


$23^\circ\text{C AL} = 39.5 \times G^{-0.70627} \text{ (nH/N}^2\text{)}$
 $G = 182.5 \times \text{AL}^{-1.41587} \text{ (mm)}$
 $100^\circ\text{C AL} = 40.0 \times G^{-0.71824} \text{ (nH/N}^2\text{)}$
 $G = 170.5 \times \text{AL}^{-1.39228} \text{ (mm)}$

NI vs. AL value



NI shows the point where the exciting current is 20% away from its extended linear part.



Magnetic Parameter

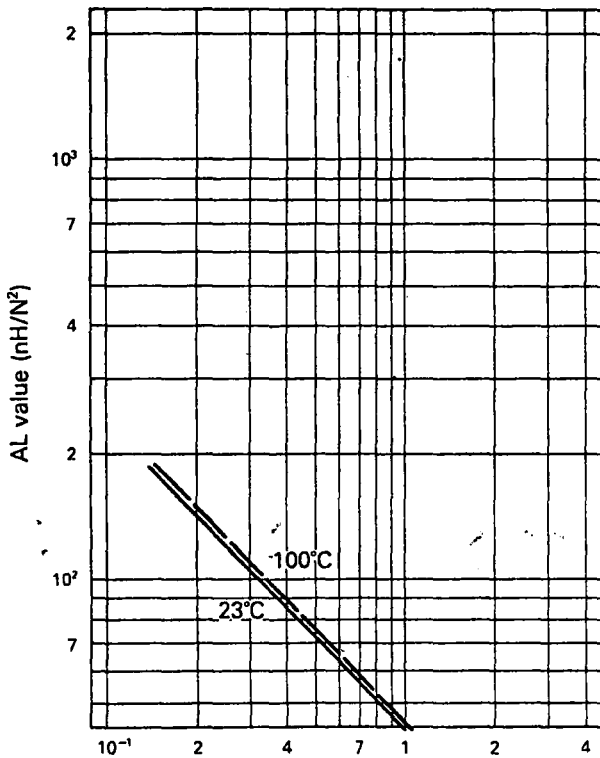
Core constant	C_1	1.7168 mm ⁻¹
Effective magnetic pass length	ℓ_e	39.6 mm
Effective cross sectional area	A_e	23.1 mm ²
Effective core volume	V_e	915 mm ³
Center leg area	A_c	22.8 mm ²
Minimum cross sectional area (Center leg)	A_{min}	22.8 mm ²
Winding area of core	A_w	55.7 mm ²

Approx. Weight 4.58 g/pair

Unit: mm

Product code	AL Value (nH/N ²)	Effective permeability μ_e	Air gap approx.	Core loss (Max.) 100kHz, 200mT (Watt)
EE19/16K	1,200 ±25% (900~1,500)	1,660	0	0.46

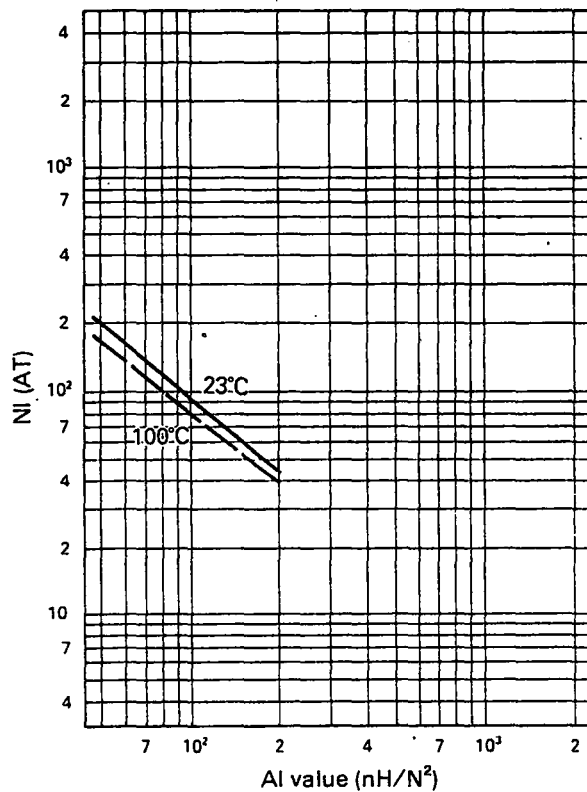
AL value vs. gap length



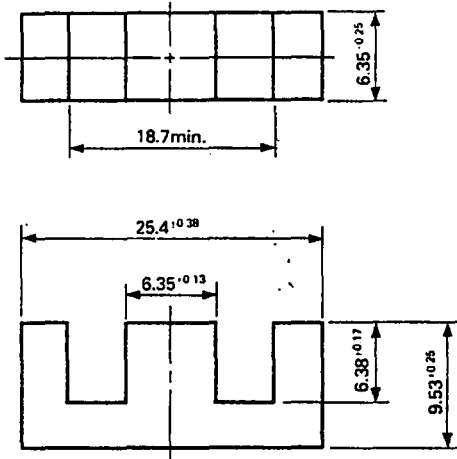
Total gap length (mm)

23°C AL = 46.5 × G^{-0.71996} (nH/N²)
 G = 207.0 × AL^{-1.38895} (mm)
 100°C AL = 47.1 × G^{-0.73349} (nH/N²)
 G = 191.4 × AL^{-1.36333} (mm)

NI vs. AL value



NI shows the point where the exciting current is 20% away from its extended linear part.

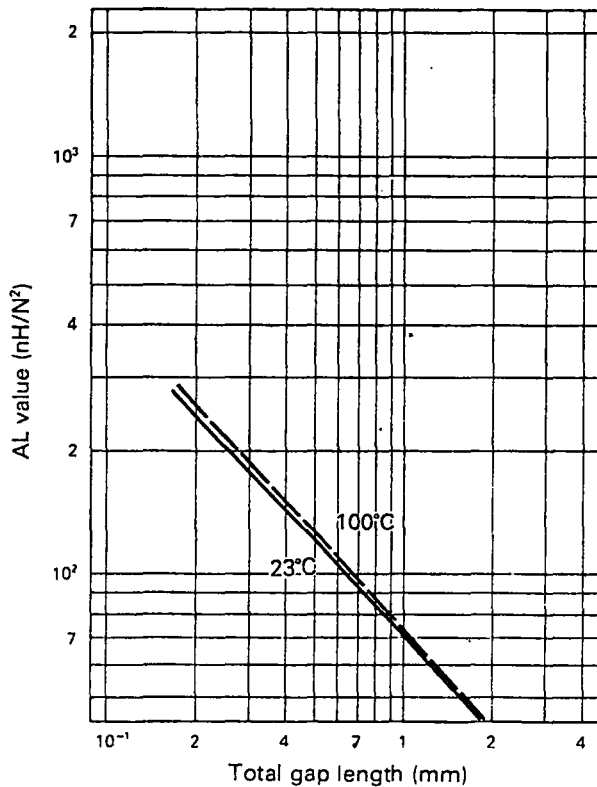


Magnetic Parameter

Core constant	C_1	1.1970 mm ⁻¹
Effective magnetic pass length	l_e	48.1 mm
Effective cross sectional area	A_e	40.2 mm ²
Effective core volume	V_e	1940 mm ³
Center leg area	A_c	40.3 mm ²
Minimum cross sectional area (Back area)	A_{min}	40.0 mm ²
Winding area of core	A_w	81.0 mm ²
Approx. Weight		10.3 g/pair

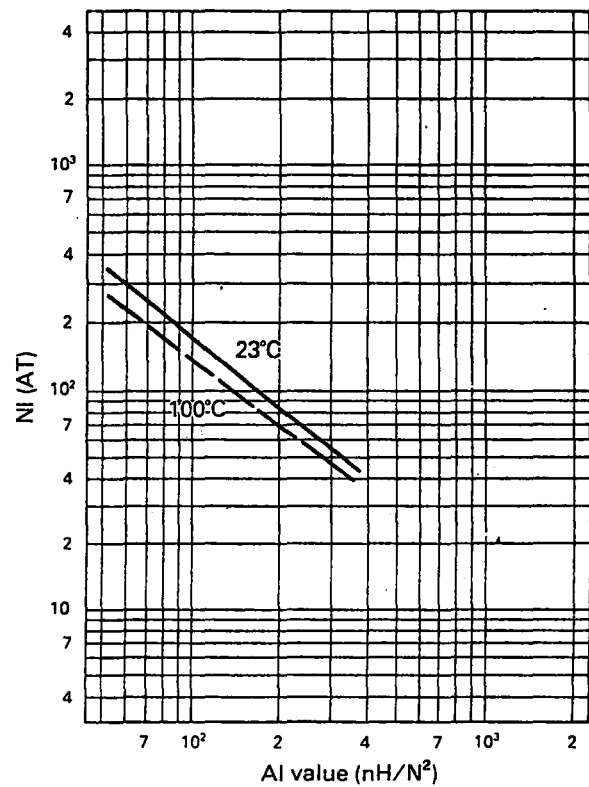
Product code	AL Value (nH/N ²)	Effective permeability μ_e	- Air gap approx.	Core loss (Max.) 100kHz, 200mT (Watt)
6H20 EE25/19Z	1,800 ±25% (1,350~2,250)	1,710	0	0.97

AL value vs. gap length

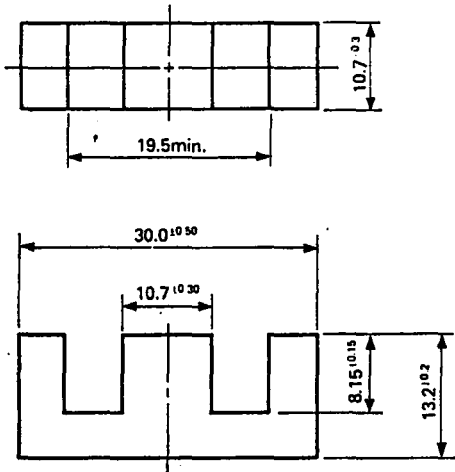


23°C AL = 72.9 × G^{-0.75529} (nH/N²)
 G = 292.6 × AL^{-1.32399} (mm)
 100°C AL = 74.1 × G^{-0.77102} (nH/N²)
 G = 266.3 × AL^{-1.29697} (mm)

NI vs. AL value



NI shows the point where the exciting current is 20% away from its extended linear part.



Magnetic Parameter

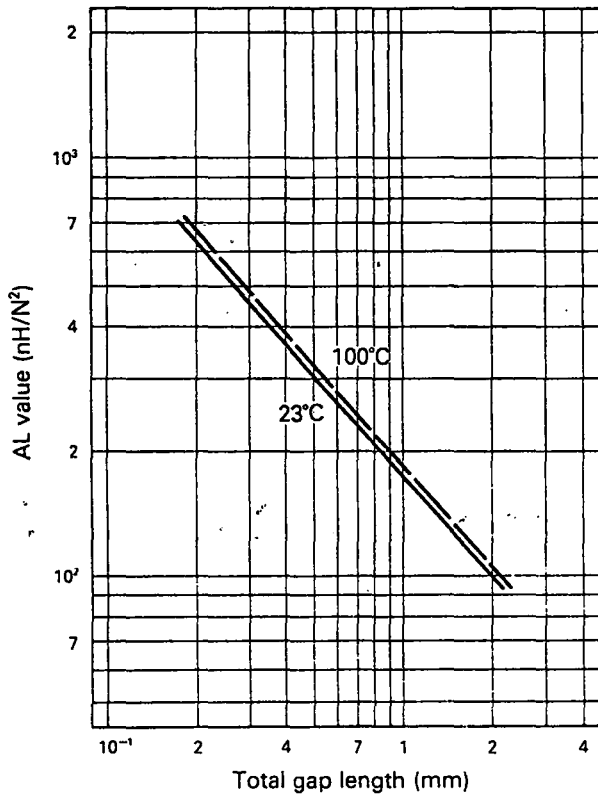
Core constant	C_1	0.52756 mm ⁻¹
Effective magnetic pass length	l_e	57.9 mm
Effective cross sectional area	A_e	110 mm ²
Effective core volume	V_e	6360 mm ³
Center leg area	A_c	114 mm ²
Minimum cross sectional area (Side leg)	A_{min}	107 mm ²
Winding area of core	A_w	75.8 mm ²

Approx. Weight 32.2 g/pair

Unit: mm

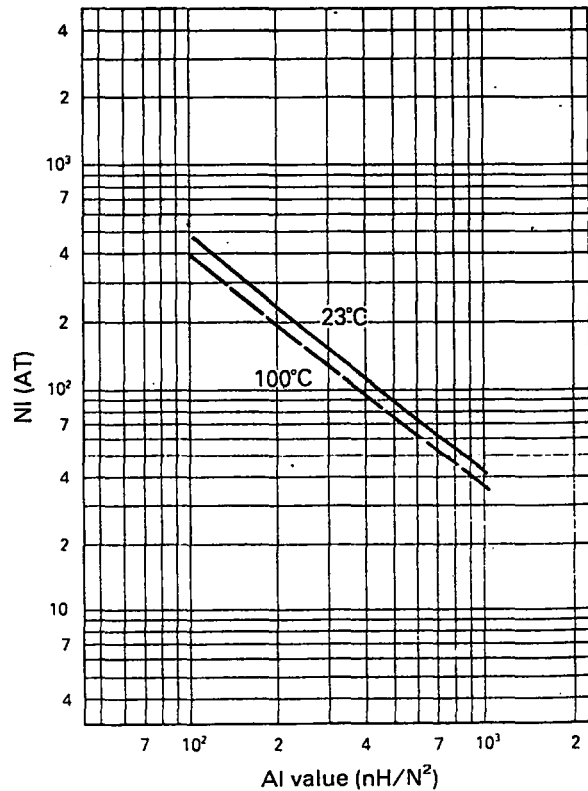
Product code	AL Value (nH/N ²)	Effective permeability μ_e	Air gap approx.	Core loss (Max.) 100kHz, 200mT (Watt)
6H20 EE30/26K	4,200 ±25% (3,150~5,250)	1,760	0	3.2

AL value vs. gap length

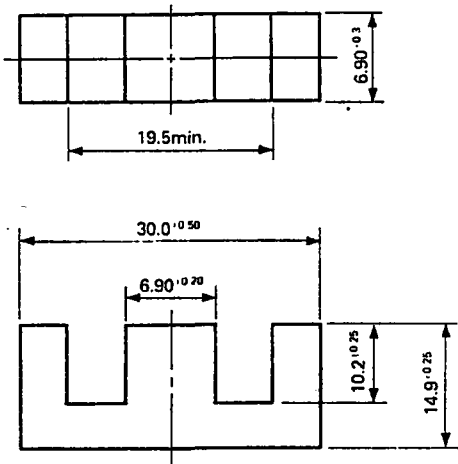


$23^\circ\text{C} \quad AL = 178.0 \times G^{-0.80723} \text{ (nH/N}^2\text{)}$
 $G = 613.6 \times AL^{-1.23880} \text{ (mm)}$
 $100^\circ\text{C} \quad AL = 181.4 \times G^{-0.82606} \text{ (nH/N}^2\text{)}$
 $G = 542.3 \times AL^{-1.21055} \text{ (mm)}$

NI vs. AL value



NI shows the point where the exciting current is 20% away from its extended linear part.



Magnetic Parameter

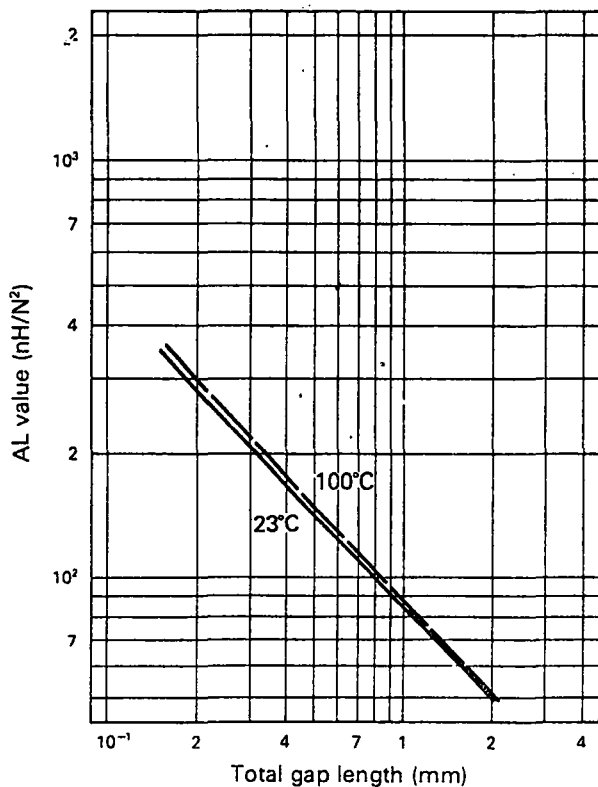
Core constant	C_1	1.1538 mm ⁻¹
Effective magnetic pass length	ℓ_e	66.1 mm
Effective cross sectional area	A_e	57.3 mm ²
Effective core volume	V_e	3790 mm ³
Center leg area	A_c	47.6 mm ²
Minimum cross sectional area (Center leg)	A_{min}	47.6 mm ²
Winding area of core	A_w	134 mm ²

Approx. Weight 20.7 g/pair

Unit: mm

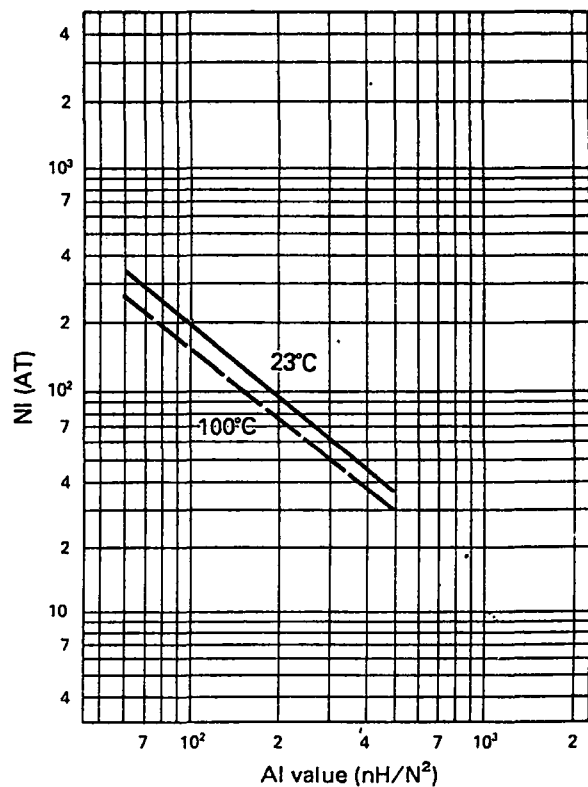
Product code	AL Value (nH/N ²)	Effective permeability μ_e	Air gap approx.	Core loss (Max.) 100kHz, 200mT (Watt)
6H20 EE30/30	1,900 ±25% (1,425~2,375)	1,780	0	1.9

AL value vs. gap length

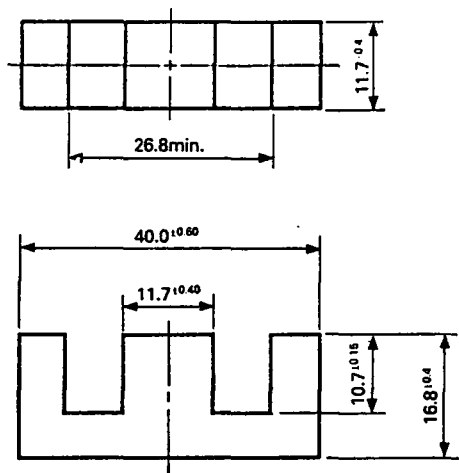


23°C AL = 87.8 × G^{-0.74930} (nH/N²)
 G = 392.8 × AL^{-1.33457} (mm)
 100°C AL = 89.6 × G^{-0.76750} (nH/N²)
 G = 350.0 × AL^{-1.30291} (mm)

NI vs. AL value



NI shows the point where the exciting current is 20% away from its extended linear part.



Magnetic Parameter

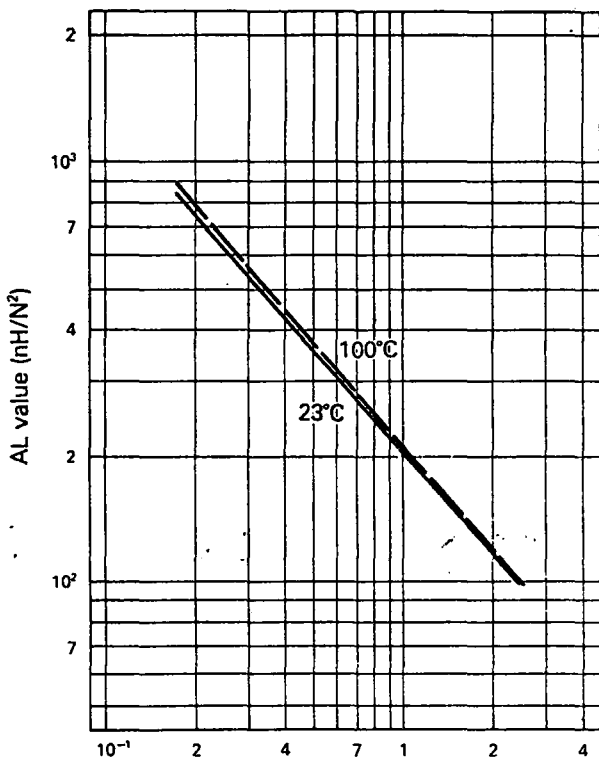
Core constant	C_1	0.54389 mm ⁻¹
Effective magnetic pass length	ℓ_e	77.5 mm
Effective cross sectional area	A_e	142 mm ²
Effective core volume	V_e	11000 mm ³
Center leg area	A_c	137 mm ²
Minimum cross sectional area (Center leg)	A_{min}	137 mm ²
Winding area of core	A_w	167 mm ²

Approx. Weight 52.0 g/pair

Unit: mm

Product code	AL Value (nH/N ²)	Effective permeability μ_e	Air gap approx.	Core loss (Max.) 100kHz, 200mT (Watt)
6H20 EE40/34B	4,200 ±25% (3,150-5,250)	1,810	0	5.5

AL value vs. gap length

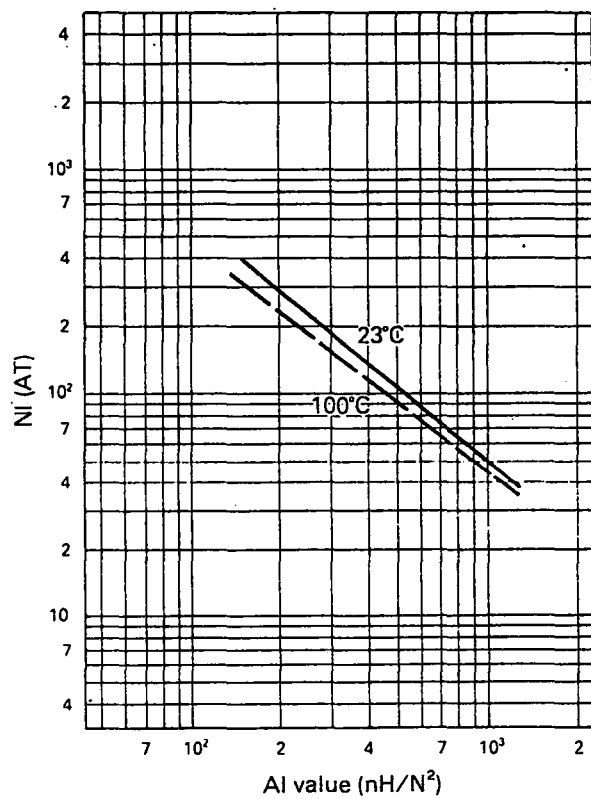


Total gap length (mm)

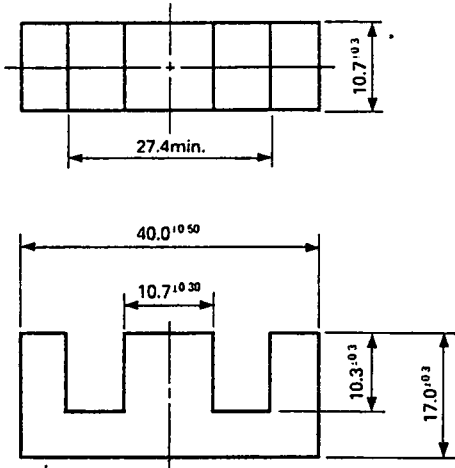
23°C AL = 208.5 × G^{-0.80091} (nH/N²)
 G = 786.4 × AL^{-1.24857} (mm)

100°C AL = 213.4 × G^{-0.82360} (nH/N²)
 G = 673.1 × AL^{-1.21417} (mm)

NI vs. AL value



NI shows the point where the exciting current is 20% away from its extended linear part.



Magnetic Parameter

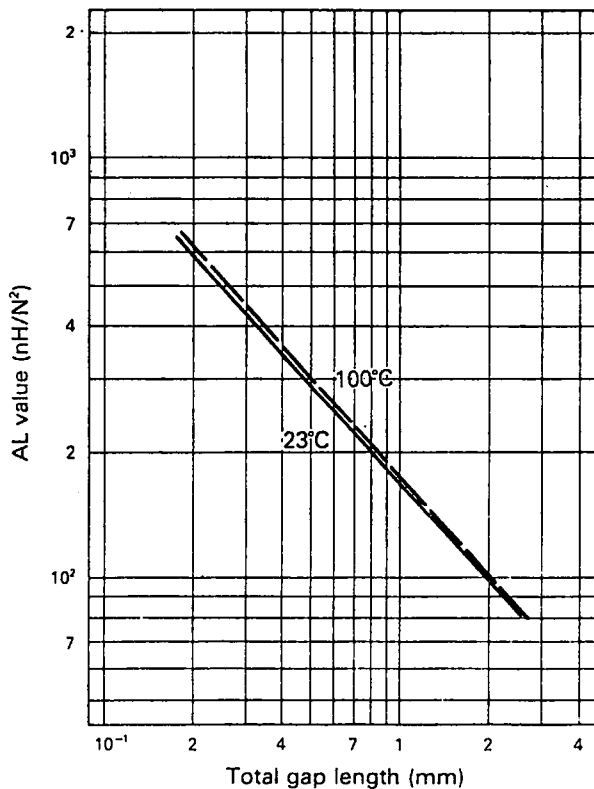
Core constant	C_1	0.60782 mm ⁻¹
Effective magnetic pass length	l_e	77.4 mm
Effective cross sectional area	A_e	127 mm ²
Effective core volume	V_e	9860 mm ³
Center leg area	A_c	114 mm ²
Minimum cross sectional area (Center leg)	A_{min}	114 mm ²
Winding area of core	A_w	178 mm ²

Approx. Weight 52.0 g/pair

Unit: mm

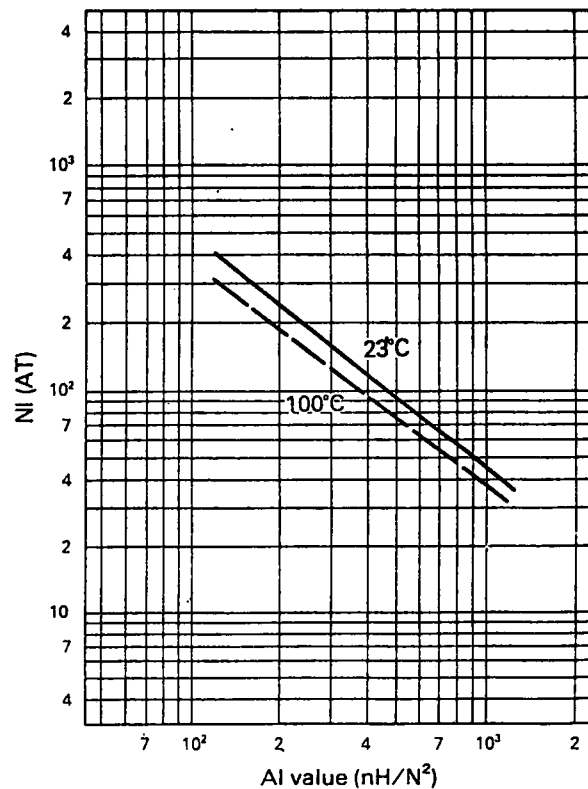
Product code	AL Value (nH/N ²)	Effective permeability μ_e	Air gap approx.	Core loss (Max.) 100kHz, 200mT (Watt)
6H20 EE40/34K	3,700 ±25% (2,775-4,625)	1,810	0	5.0

AL value vs. gap length

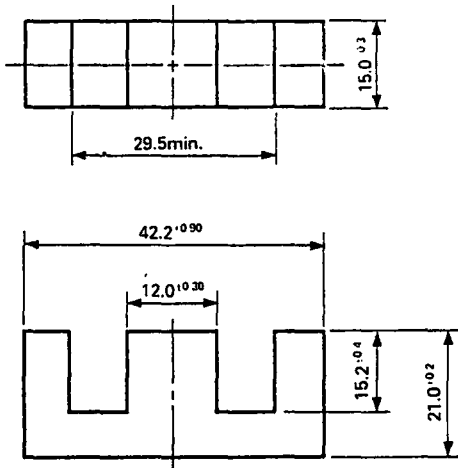


$23^\circ\text{C AL} = 179.0 \times G^{-0.79467} \text{ (nH/N}^2\text{)}$
 $G = 683.8 \times \text{AL}^{-1.25837} \text{ (mm)}$
 $100^\circ\text{C AL} = 182.9 \times G^{-0.81610} \text{ (nH/N}^2\text{)}$
 $G = 591.8 \times \text{AL}^{-1.22533} \text{ (mm)}$

NI vs. AL value



NI shows the point where the exciting current is 20% away from its extended linear part.



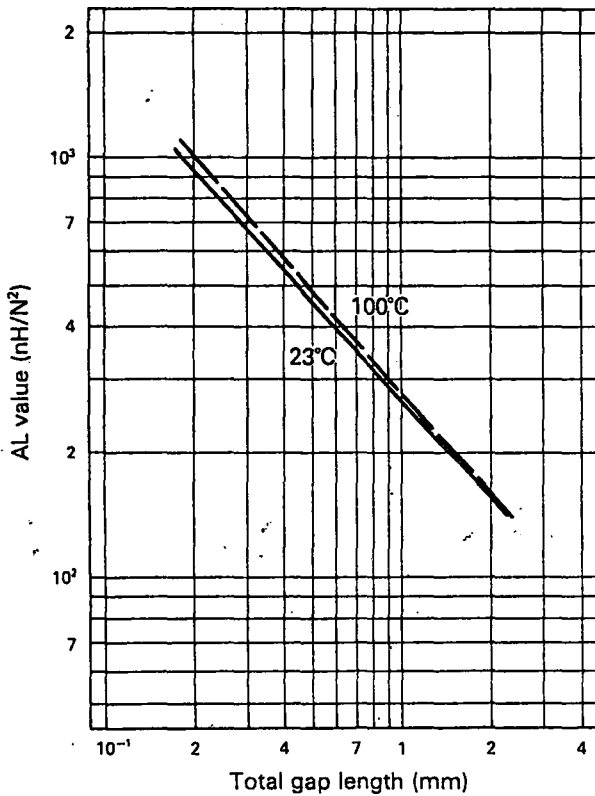
Magnetic Parameter

Core constant	C_1	0.54243 mm ⁻¹
Effective magnetic pass length	ℓ_e	97.8 mm
Effective cross sectional area	A_e	180 mm ²
Effective core volume	V_e	17600 mm ³
Center leg area	A_c	180 mm ²
Minimum cross sectional area (Center leg) (Back area)	A_{min}	180 mm ²
Winding area of core	A_w	276 mm ²
Approx. Weight		87.0 g/pair

Unit: mm

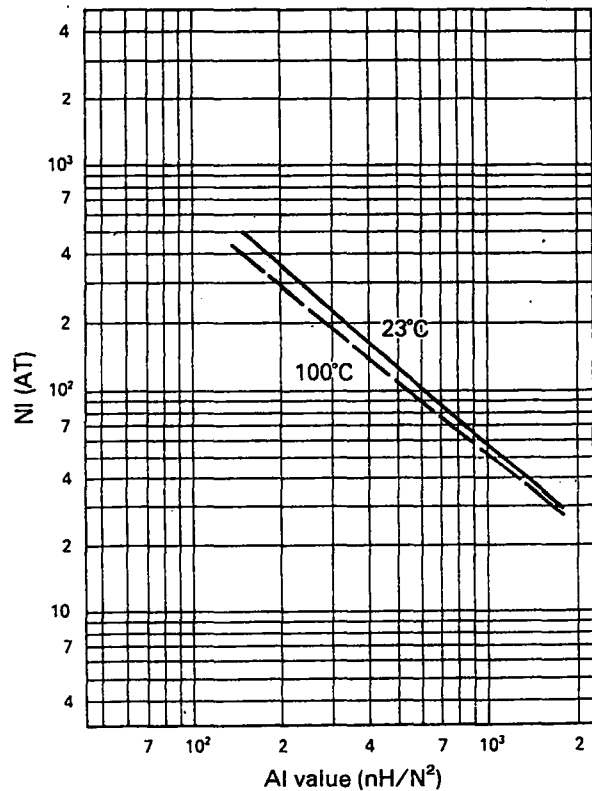
Product code	AL Value (nH/N ²)	Effective permeability μ_e	Air gap approx.	Core loss (Max.) 100kHz, 200mT (Watt)
6H20 EE42/42-15W	4,300 ±25% (3,225~5,375)	1,850	0	8.8

AL value vs. gap length

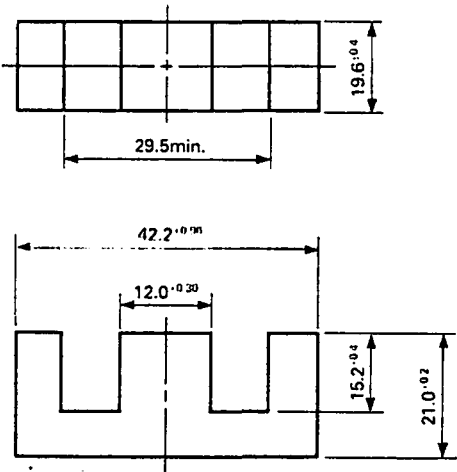


$23^\circ\text{C} \quad AL = 270.4 \times G^{-0.78490} \text{ (nH/N}^2\text{)}$
 $G = 1255.0 \times AL^{-1.27403} \text{ (mm)}$
 $100^\circ\text{C} \quad AL = 278.6 \times G^{-0.81352} \text{ (nH/N}^2\text{)}$
 $G = 1012.9 \times AL^{-1.22921} \text{ (mm)}$

NI vs. AL value



NI shows the point where the exciting current is 20% away from its extended linear part.

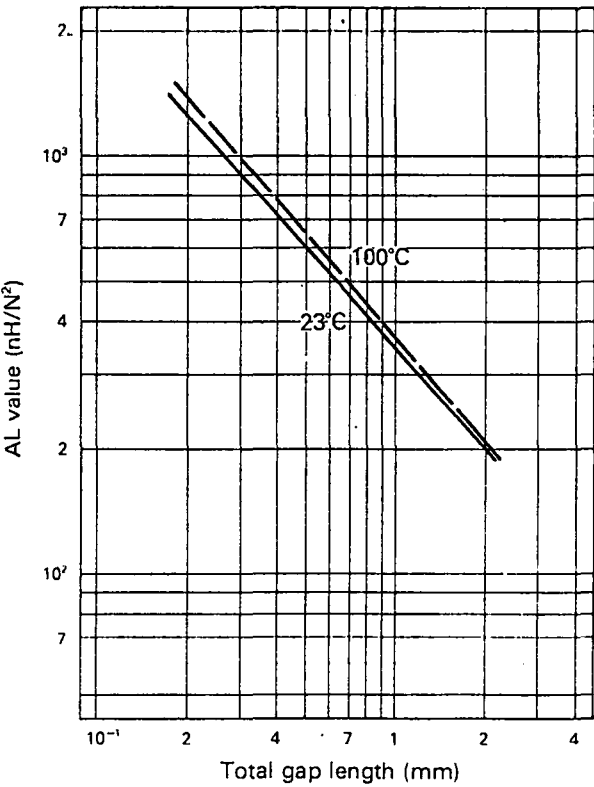


Magnetic Parameter

Core constant	C_1	0.41512 mm ⁻¹
Effective magnetic pass length	l_e	97.8 mm
Effective cross sectional area	A_e	236 mm ²
Effective core volume	V_e	23000 mm ³
Center leg area	A_c	235 mm ²
Minimum cross sectional area (Center leg)(Back area)	A_{min}	235 mm ²
Winding area of core	A_w	276 mm ²
Approx. Weight		118 g/pair
		Unit: mm

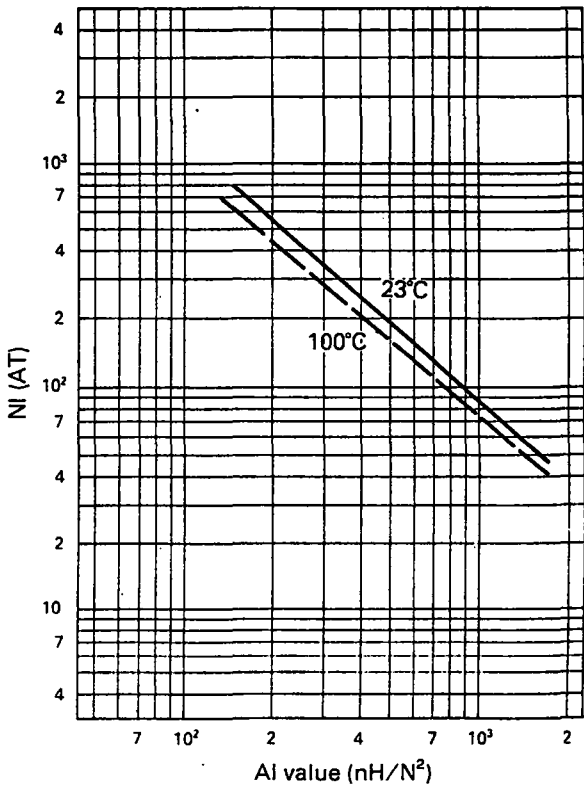
Product code	AL Value (nH/N ²)	Effective permeability μ_e	Air gap approx.	Core loss (Max.) 100kHz, 200mT (Watt)
6H20 EE42/42-20W	5,600 ±25% (3,200~7,000)	1,850	0	11.5

AL value vs. gap length

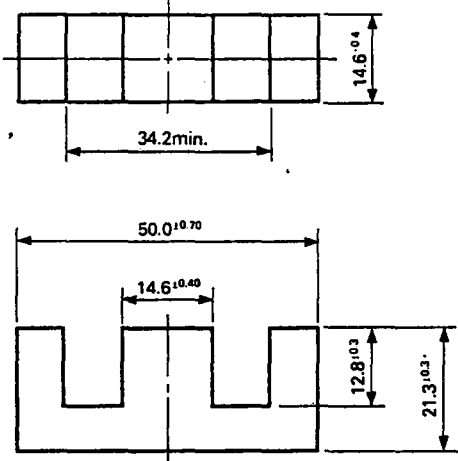


23°C AL = 345.4 × G^{-0.79672} (nH/N²)
 G = 1534.8 × AL^{-1.25514} (mm)
 100°C AL = 355.7 × G^{-0.82538} (nH/N²)
 G = 1232.6 × AL^{-1.21155} (mm)

NI vs. AL value



NI shows the point where the exciting current is 20% away from its extended linear part.



Magnetic Parameter

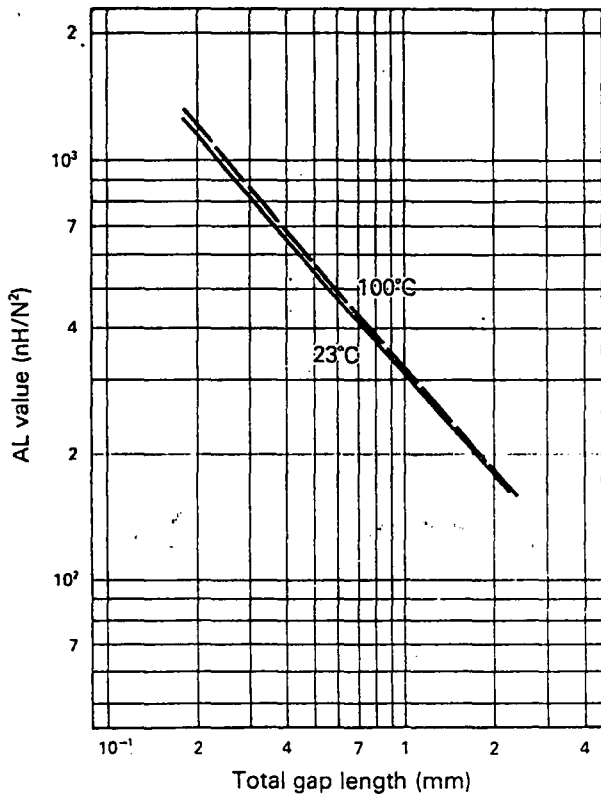
Core constant	C_1	0.42677 mm ⁻¹
Effective magnetic pass length	l_e	96.3 mm
Effective cross sectional area	A_e	226 mm ²
Effective core volume	V_e	21700 mm ³
Center leg area	A_c	213 mm ²
Minimum cross sectional area (Center-leg)	A_{min}	213 mm ²
Winding area of core	A_w	261 mm ²

Approx. Weight 113 g/pair

Unit: mm

Product code	AL Value (nH/N ²)	Effective permeability μ_e	Air gap approx.	Core loss (Max.) 100kHz, 200mT (Watt)
6H20 EE50/42K	5,500 ±25% (4,125~6,875)	1,850	0	10.9

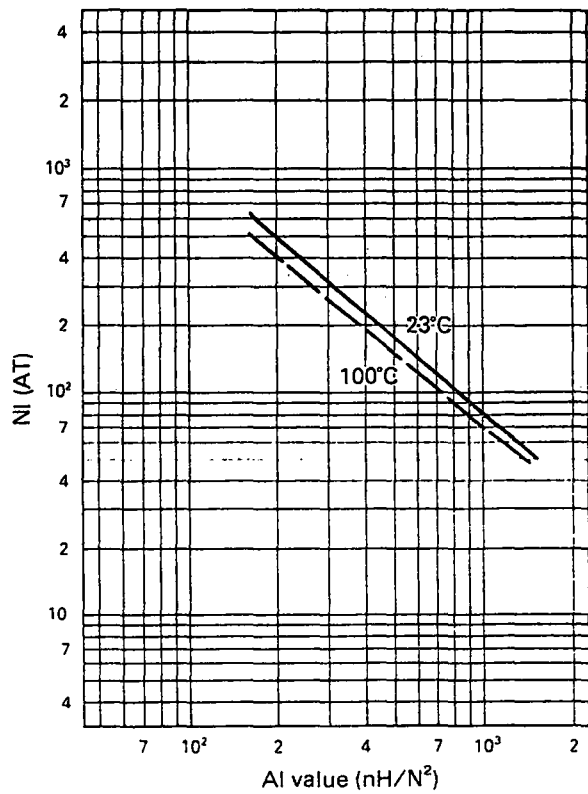
AL value vs. gap length



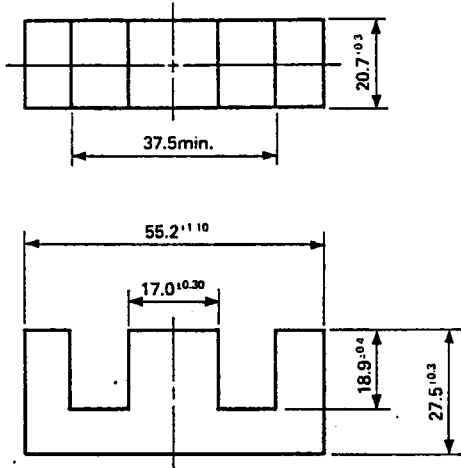
23°C AL = 308.8 × G^{-0.80547} (nH/N²)
 G = 1233.2 × AL^{-1.24150} (mm)

100°C AL = 317.2 × G^{-0.83219} (nH/N²)
 G = 1013.5 × AL^{-1.20164} (mm)

NI vs. AL value



NI shows the point where the exciting current is 20% away from its extended linear part.



Magnetic Parameter

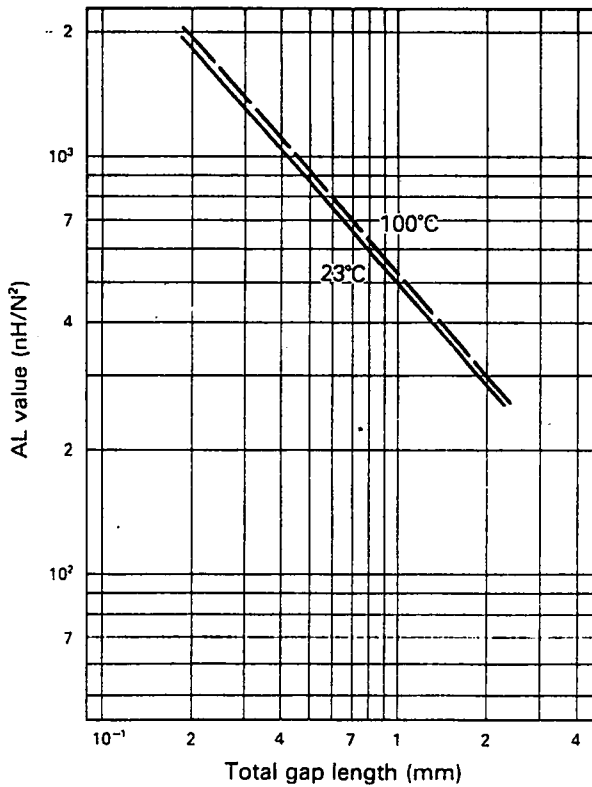
Core constant	C_1	0.34989 mm ⁻¹
Effective magnetic pass length	ℓ_e	124 mm
Effective cross sectional area	A_e	353 mm ²
Effective core volume	V_e	43700 mm ³
Center leg area	A_c	352 mm ²
Minimum cross sectional area (Center leg)	A_{min}	352 mm ²
Winding area of core	A_w	400 mm ²

Approx. Weight 218 g/pair

Unit: mm

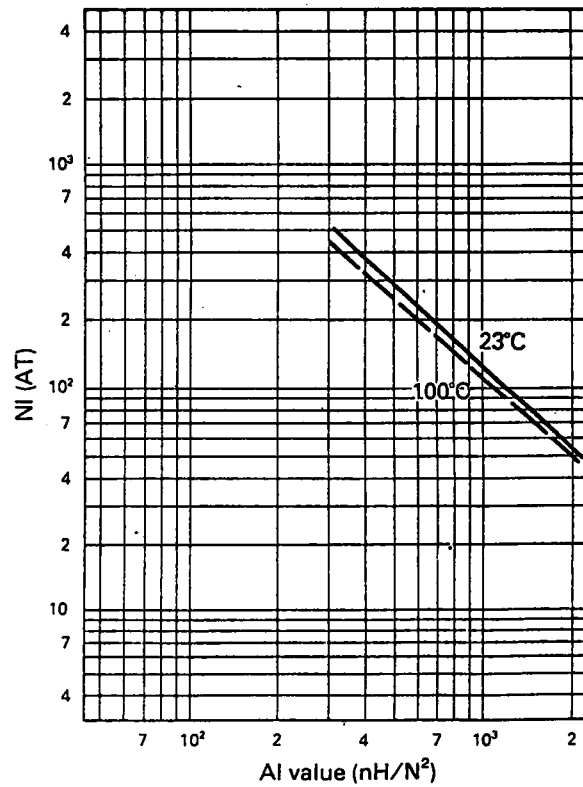
Product code	AL Value (nH/N ²)	Effective permeability μ_e	Air gap approx.	Core loss (Max.) 100kHz, 200mT (Watt)
6H20 EE55/55A	6,700 ±25% (5,025–8,375)	1,880	0	21.9

AL value vs. gap length



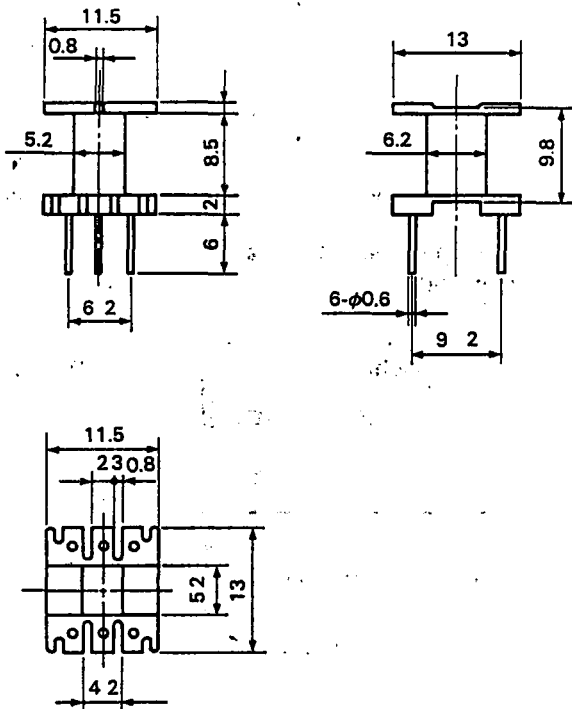
$23^\circ\text{C} \quad AL = 489.8 \times G^{-0.79375} \text{ (nH/N}^2\text{)}$
 $G = 2449.5 \times AL^{-1.25983} \text{ (mm)}$
 $100^\circ\text{C} \quad AL = 507.1 \times G^{-0.82785} \text{ (nH/N}^2\text{)}$
 $G = 1852.3 \times AL^{-1.20794} \text{ (mm)}$

NI vs. AL value



NI shows the point where the exciting current is 20% away from its extended linear part.

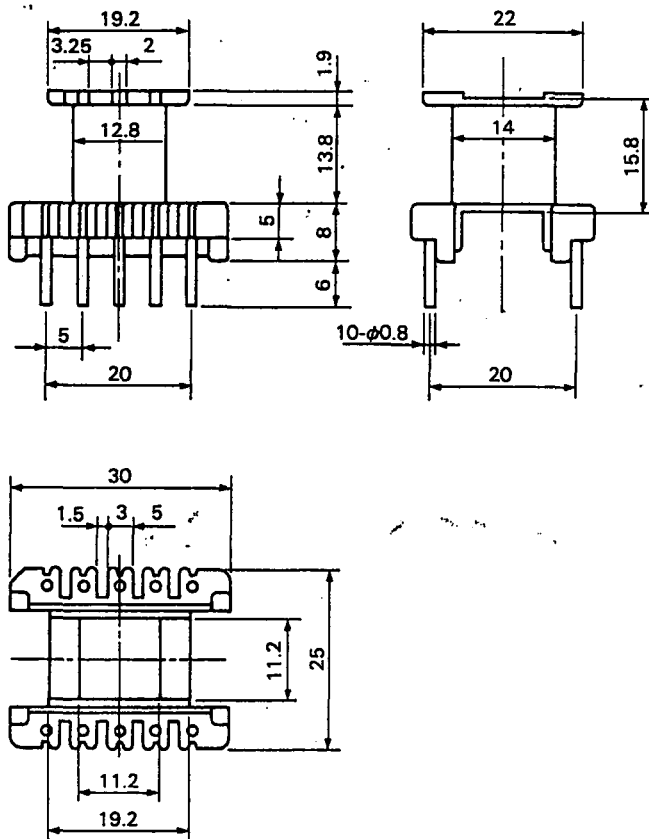
AB EE16/14K-1C6E



Material	Phenol UL94V-0
Limit operating temperature (°C)	150
Window area (mm ²)	26.7
Average length of turn (mm)	32.6
Approx. weight (g)	0.6

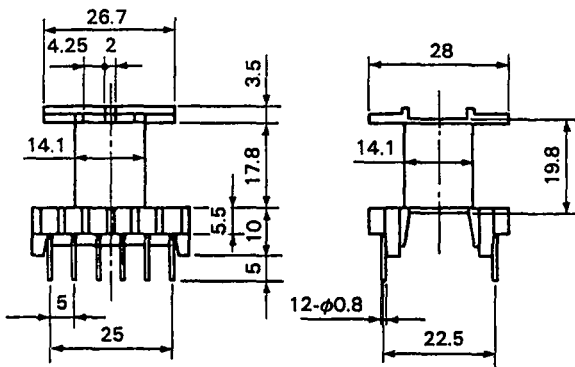
Unit: mm

AB EE30/26K-110E

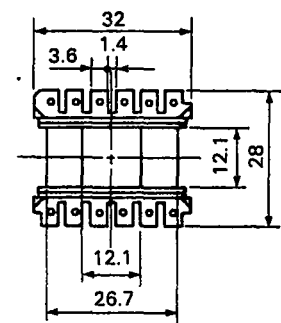


Material	Phenol UL94V-0
Limit operating temperature (°C)	150
Window area (mm ²)	44.1
Average length of turn (mm)	68.0
Approx. weight (g)	4.4

Unit: mm

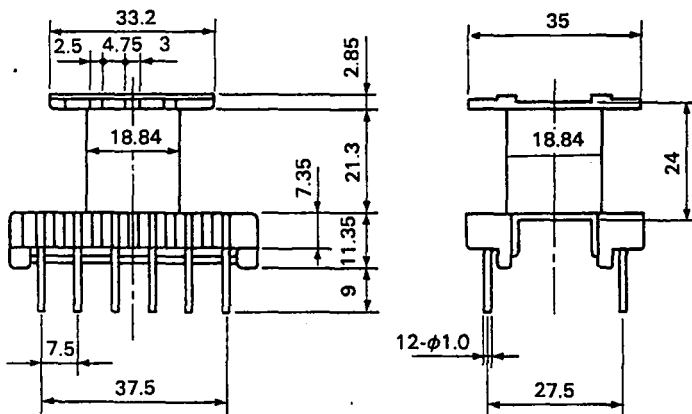


AB EE40/34K-112E

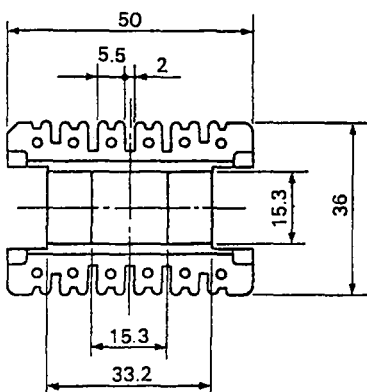


Material	Phenol UL94V-0
Limit operating temperature (°C)	150
Window area (mm ²)	112.0
Average length of turn (mm)	76.0
Approx. weight (g)	6.8

Unit: mm



AB EE50/42K-112E



Material	Phenol UL94V-0
Limit operating temperature (°C)	150
Window area (mm ²)	152.0
Average length of turn (mm)	104.0
Approx. weight (g)	17.0

ภาคผนวก ค

LINEAR INTEGRATED CIRCUITS

TYPES TL493, TL494, TL495 PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

D2535, JANUARY 1983—REVISED SEPTEMBER 1983

- Complete PWM Power Control Circuitry
- Uncommitted Outputs for 200-mA Sink or Source Current
- Output Control Selects Single-Ended or Push-Pull Operation
- Internal Circuitry Prohibits Double Pulse at Either Output
- Variable Dead-Time Provides Control Over Total Range
- Internal Regulator Provides a Stable 5-V Reference Supply Trimmed to 1%
- Circuit Architecture Allows Easy Synchronization
- TL493 Has Output Current-Limit Sensing
- TL495 Has On-Chip 39-V Zener and External Control of Output Steering

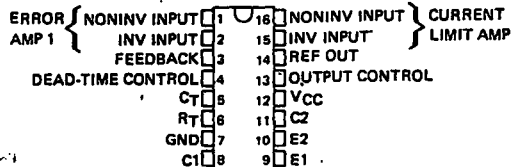
description

The TL493, TL494, and TL495 each incorporate on a single monolithic chip all the functions required in the construction of a pulse-width-modulation control circuit. Designed primarily for power supply control, these devices offer the systems engineer the flexibility to tailor the power supply control circuitry to his application.

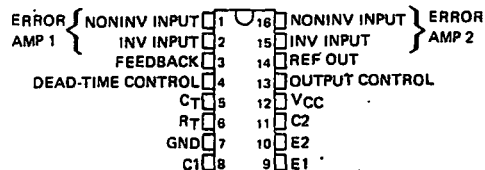
The TL493 contains an error amplifier, current-limiting amplifier, an on-chip adjustable oscillator, a dead-time control comparator, pulse-steering control flip-flop, a 5-volt, 1%-precision regulator, and output-control circuits.

The error amplifier exhibits a common-mode voltage range from -0.3 volts to $V_{CC} - 2$ volts. The current-limit amplifier exhibits a common-mode voltage range from -0.3 volts to 3 volts with an offset voltage of approximately 80 millivolts in series with the inverting input to ease circuit design requirements. The dead-time control comparator has a fixed offset that provides approximately 5% dead time when externally altered. The on-chip oscillator may be bypassed by terminating R_T (pin 6) to the reference output and providing a sawtooth input to C_T (pin 5), or it may be used to drive the common circuits in synchronous multiple-rail power supplies.

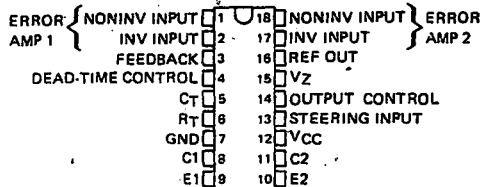
TL493C . . . N DUAL-IN-LINE PACKAGE (TOP VIEW)



TL494M . . . J TL494I, TL494C . . . J OR N DUAL-IN-LINE PACKAGE (TOP VIEW)



TL495C . . . N DUAL-IN-LINE PACKAGE (TOP VIEW)



DEVICE TYPES, SUFFIX VERSIONS, AND PACKAGES

	TL493	TL494	TL495
TL49-M	.	J	.
TL49-I	.	J,N	.
TL49-C	N	J,N	N.

*These combinations are not defined by this data sheet.

FUNCTION TABLE

INPUTS		OUTPUT FUNCTION
OUTPUT CONTROL	STEERING INPUT (TL495 only)	
$V_I \leq 0.4$ V	Open	Single-ended or parallel output
$V_I \geq 2.4$ V	Open	Normal push-pull operation
$V_I \geq 2.4$ V	$V_I \leq 0.4$ V	PWM Output at Q1
$V_I \geq 2.4$ V	$V_I \geq 2.4$ V	PWM Output at Q2

Voltage Regulators



TYPES TL493, TL494, TL495 PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

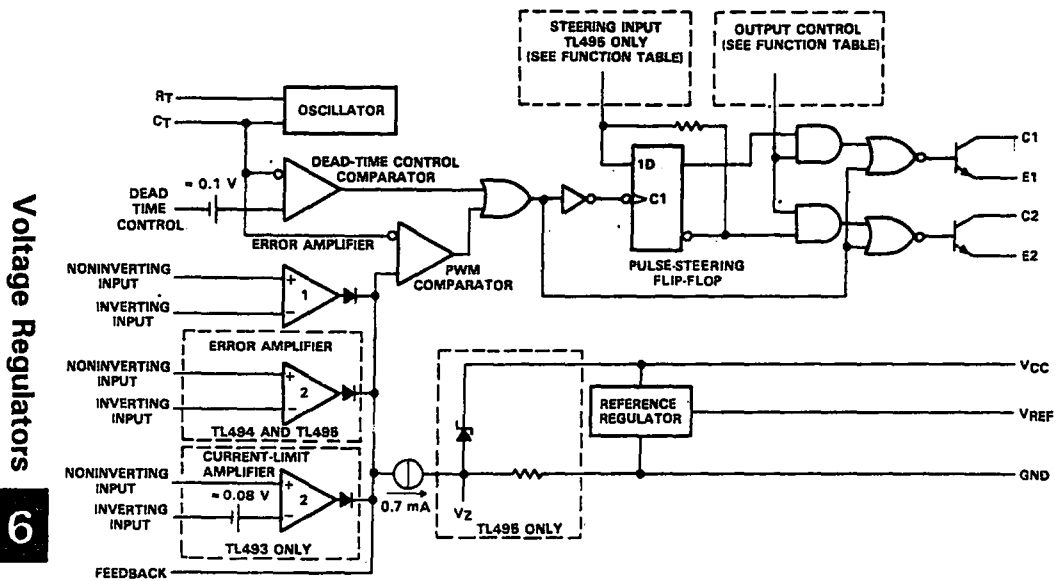
description (continued)

The uncommitted output transistors provide either common-emitter or emitter-follower output capability. Each device provides for push-pull or single-ended output operation, which may be selected through the output-control function. The architecture of these devices prohibits the possibility of either output being pulsed twice during push-pull operation.

The TL493 and TL494 are similar except that an additional error amplifier is included in the TL494 instead of a current-limiting amplifier. The TL495 provides the identical functions found in the TL494. In addition, it contains an on-chip 39-volt zener diode for high-voltage applications where V_{CC} is greater than 40 volts, and an output-steering control that overrides the internal control of the pulse-steering flip-flop.

The TL494M is characterized for operation over the full military temperature range from -55°C to 125°C . The TL494I is characterized for operation from -25°C to 85°C . The TL493C, TL494C, and TL495C are characterized for operation from 0°C to 70°C .

functional block diagram



TYPES TL493, TL494, TL495 PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range
(unless otherwise noted)

	TL494M	TL494I	TL493C TL494C TL495C	UNIT
Supply voltage, V_{CC} (see Note 1)	41	41	41	V
Amplifier input voltages	$V_{CC}+0.3$	$V_{CC}+0.3$	$V_{CC}+0.3$	V
Collector output voltage	41	41	41	V
Collector output current	250	250	250	mA
Continuous total dissipation at (or below) 25 °C free-air temperature (see Note 2)	1000	1000	1000	mW
Operating free-air temperature range	-55 to 125	-25 to 85	0 to 70	°C
Storage temperature range	-65 to 150	-65 to 150	-65 to 150	°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 60 seconds: J package	300	300	300	°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds: N package		260	260	°C

- NOTES: 1. All voltage values, except differential voltages, are with respect to the network ground terminal.
2. For operation above 25 °C free-air temperature, refer to Dissipation Derating Table. In the J package, TL494M chips are alloy-mounted; TL494I and TL494C chips are glass mounted.

DISSIPATION DERATING TABLE

PACKAGE	POWER RATING	DERATING FACTOR	ABOVE T_A
J (Alloy-Mounted Chip)	1000 mW	11.0 mW/°C	59 °C
J (Glass-Mounted Chip)	1000 mW	8.2 mW/°C	28 °C
N	1000 mW	9.2 mW/°C	41 °C

recommended operating conditions

	TL494M		TL494I		TL493C TL494C TL495C		UNIT
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	
Supply voltage, V_{CC}	7	40	7	40	7	40	V
Amplifier input voltages, V_I	-0.3	$V_{CC}-2$	-0.3	$V_{CC}-2$	-0.3	$V_{CC}-2$	V
Collector output voltage, V_O		40		40		40	V
Collector output current (each transistor)		200		200		200	mA
Current into feedback terminal		0.3		0.3		0.3	mA
Timing capacitor, C_T	0.47	10 000	0.47	10 000	0.47	10 000	nF
Timing resistor, R_T	1.8	500	1.8	500	1.8	500	kΩ
Oscillator frequency	1	300	1	300	1	300	kHz
Operating free-air temperature, T_A	-55	125	-25	85	0	70	°C

Voltage Regulators



TYPES TL493, TL494, TL495 PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range, $V_{CC} = 15\text{ V}$, $f = 10\text{ kHz}$
(unless otherwise noted)

reference section

PARAMETER	TEST CONDITIONS [†]	TL494M			TL493C TL494I, TL494C TL495C			UNIT
		MIN	TYP [‡]	MAX	MIN	TYP [‡]	MAX	
Output voltage (V_{ref})	$I_O = 1\text{ mA}$	4.75	5	5.25	4.75	5	5.25	V
Input regulation	$V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$		2	25		2	25	mV
Output regulation	$I_O = 1\text{ to }10\text{ mA}$		1	15		1	15	mV
Output voltage change with temperature	$\Delta T_A = \text{MIN to MAX}$		0.2	1		0.2	1	%
Short-circuit output current [§]	$V_{ref} = 0$	10	35	50		35		mA

oscillator section (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS [†]	TL494M			TL493C TL494I, TL494C TL495C			UNIT
		MIN	TYP [‡]	MAX	MIN	TYP [‡]	MAX	
Frequency	$C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$		10			10		kHz
Standard deviation of frequency [¶]	All values of V_{CC} , C_T , R_T , T_A constant		10			10		%
Frequency change with voltage	$V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$		0.1			0.1		%
Frequency change with temperature	$C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$, $\Delta T_A = \text{MIN to MAX}$			12			12	%

amplifier sections (see Figure 2)

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP [‡]	MAX	UNIT
Input offset voltage	Error		$V_O(\text{pin } 3) = 2.5\text{ V}$		2	
	Current-limit (TL493 only)			80		
Input offset current		$V_O(\text{pin } 3) = 2.5\text{ V}$		25	250	nA
Input bias current		$V_O(\text{pin } 3) = 2.5\text{ V}$		0.2	1	μA
Common-mode input voltage range	Error	$V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$		-0.3		V
	Current-limit (TL493 only)			$V_{CC} - 2$		
Open-loop voltage amplification	Error	$\Delta V_O = 3\text{ V}$, $V_O = 0.5\text{ V to }3.5\text{ V}$		70	95	dB
	Current-limit (TL493 only)				90	
Unity-gain bandwidth				800		kHz
Common-mode rejection ratio	Error	$V_{CC} = 40\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$		65	80	dB
	Current-limit (TL493 only)				70	
Output sink current (pin 3)		$V_{ID} = -15\text{ mV to }-5\text{ V}$, $V(\text{pin } 3) = 0.5\text{ V}$	0.3	0.7		mA
Output source current (pin 3)		$V_{ID} = 15\text{ mV to }5\text{ V}$, $V(\text{pin } 3) = 3.5\text{ V}$	-2			mA

[†]For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

[‡]All typical values except for parameter changes with temperature are at $T_A = 25^\circ\text{C}$.

[§]Duration of the short-circuit should not exceed one second.

[¶]Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$

**TYPES TL493, TL494, TL495
PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS**

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range, $V_{CC} = 15\text{ V}$, $f = 10\text{ kHz}$ (unless otherwise noted)

output section

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TL494M		TL493C TL494I, TL494C TL495C		UNIT	
		MIN	TYP [†]	MAX	MIN		TYP [†]
Collector off-state current	$V_{CE} = 40\text{ V}$, $V_{CC} = 40\text{ V}$	2	100		2	100	μA
Emitter off-state current	$V_{CC} = V_C = 40\text{ V}$, $V_E = 0$			-150		-100	μA
Collector-emitter saturation voltage	$V_E = 0$, $I_C = 200\text{ mA}$	1.1	1.5		1.1	1.3	V
Emitter-follower saturation voltage	$V_C = 15\text{ V}$, $I_E = -200\text{ mA}$	1.5	2.5		1.5	2.5	V
Output control input current	$V_I = V_{ref}$		3.5			3.5	mA

dead-time control-section (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP [†]	MAX	UNIT
Input bias current (pin 4)	$V_I = 0$ to 5.25 V		-2	-10	μA
Maximum duty cycle, each output	V_I (pin 4) = 0	45			%
Input threshold voltage (pin 4)	Zero duty cycle		3	3.3	V
	Maximum duty cycle	0			

pwm comparator section (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP [†]	MAX	UNIT
Input threshold voltage (pin 3)	Zero duty cycle		4	4.5	V
Input sink current (pin 3)	V (pin 3) = 0.7 V	0.3	0.7		mA

steering control (TL495 only)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	MAX	UNIT
Input current	$V_I = 0.4\text{ V}$		-200	μA
	$V_I = 2.4\text{ V}$		200	

zener-diode circuit (TL495 only)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP [†]	MAX	UNIT
Breakdown voltage	$V_{CC} = 41\text{ V}$, $I_Z = 2\text{ mA}$		39		V
Sink current	V (pin 15) = 1 V		0.3		mA

total device (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP [†]	MAX	UNIT	
Standby supply current	Pin 6 at V_{ref} , All other inputs and outputs open	$V_{CC} = 15\text{ V}$		6	10	mA
		$V_{CC} = 40\text{ V}$		9	15	
Average supply current	V (pin 4) = 2 V		7.5		mA	

switching characteristics, $T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP [†]	MAX	UNIT
Output voltage rise time	Common-emitter configuration,		100	200	ns
Output voltage fall time	See Figure 3		25	100	ns
Output voltage rise time	Emitter-follower configuration,		100	200	ns
Output voltage fall time	See Figure 4		40	100	ns

[†]All typical values except for temperature coefficient are at $T_A = 25^\circ\text{C}$.

Voltage Regulators

**TYPES TL493, TL494, TL495
PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS**

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

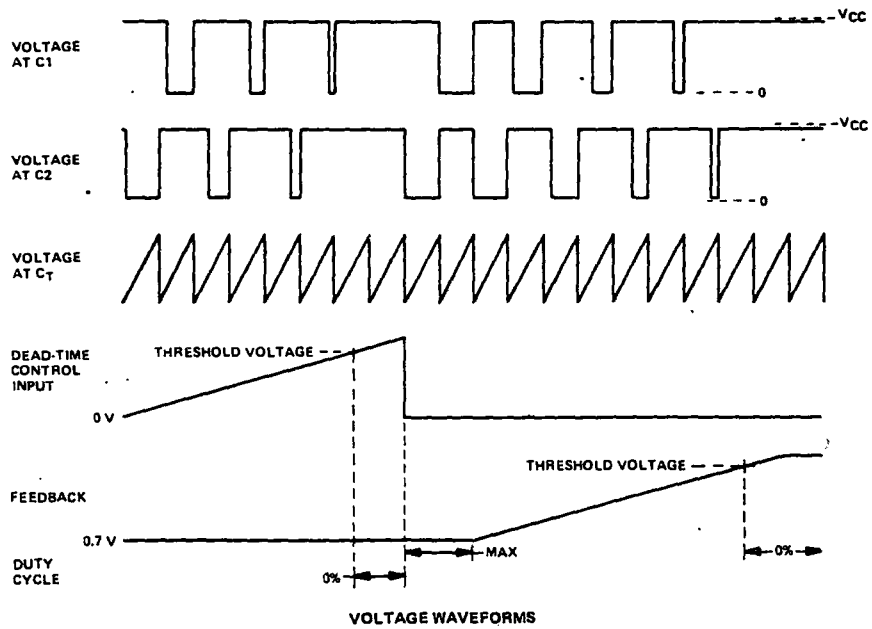
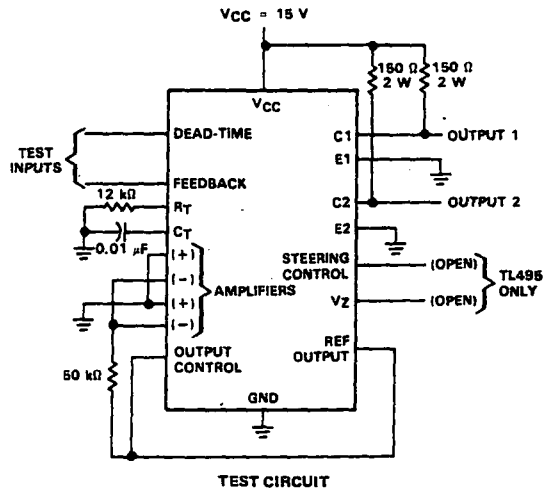


FIGURE 1—OPERATIONAL TEST CIRCUIT AND WAVEFORMS

Voltage Regulators

**TYPES TL493, TL494, TL495
PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS**

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

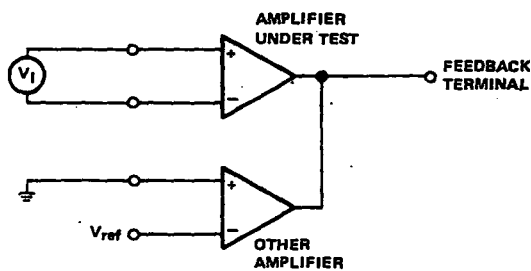


FIGURE 2 - AMPLIFIER CHARACTERISTICS

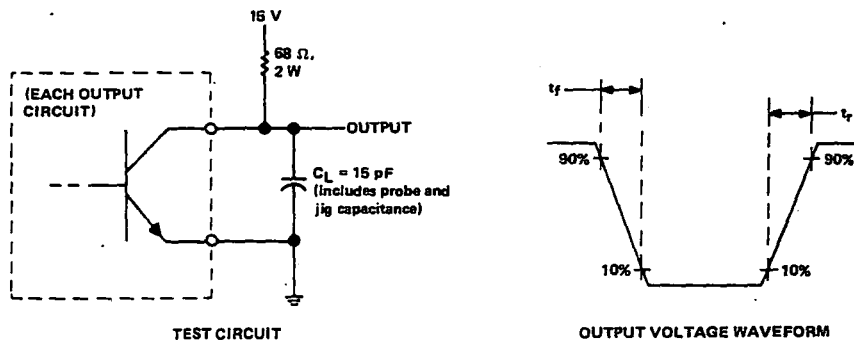


FIGURE 3 - COMMON-EMITTER CONFIGURATION

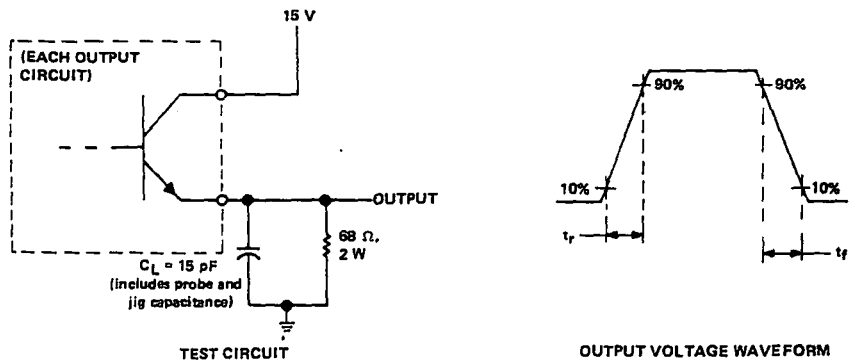


FIGURE 4 - EMITTER-FOLLOWER CONFIGURATION

ประวัติผู้แต่ง

นายชินวรัตน์ ทรัพย์จรัสแสง

เกิดเมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ.2516 ที่จังหวัดนครพนม จบการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนบุรีรัมย์วิทยาคม หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อที่โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย จนสำเร็จชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 สาขาวิทย์-คณิต แล้วเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี ในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2533

นางสาวพรพรรณ เปรมปรีชากุล

เกิดเมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2515 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ จบการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเอกประสิทธิ์ศึกษา หลังจากนั้น ได้เข้าศึกษาต่อที่โรงเรียนศึกษานารี และโรงเรียนธนบุรีวชิรเทพพัลลภารักษ์ จนสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 3 และชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 ตามลำดับ จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี ในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2533