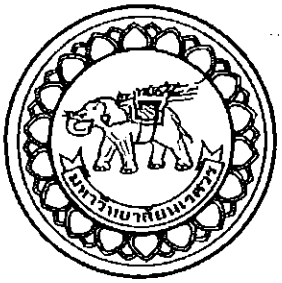
อภินันทนาการ



สำนักหอสมุด

ศึกษาผลกระทบของการใช้หลอดปล่อยประจุความเข้มสูง

The Study Effect of Using High Intensity Discharge Lamps

1719493

นายเอกสิทธิ์ ทองสุข รหัส 45380185

ป
ด 885 ศ
2551

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
วันลงทะเบียน 10 ก.ค. 2560
เลขทะเบียน.....
เลขเรียกหนังสือ.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2552

ใบรับรองโครงงานวิศวกรรม

หัวข้อโครงงาน ศึกษาผลกระทบของการใช้หลอดปล่อยประจุความเข้มสูง

ผู้ดำเนินโครงงาน นายเอกสิทธิ์ ทองสุข รหัส 45380185

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2552

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการสอบโครงงานวิศวกรรม

.....ประธานกรรมการ

(ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช)

.....กรรมการ

(อาจารย์แสงชัย มังกรทอง)

.....กรรมการ

(ดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห)

หัวข้อโครงงาน	ศึกษาผลกระทบของการใช้หลอดปล่อยประจุความเข้มสูง
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายเอกสิทธิ์ ทองสุข รหัส 45380185
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2552

.....

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของหลอดปล่อยประจุความเข้มสูง ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ หลอดแสงจันทร์ หลอดเมทัลฮาไลด์ และหลอดโซเดียมความดันสูง การศึกษามุ่งเน้นที่คุณลักษณะของหลอดไฟขณะทำงาน โดยเฉพาะรูปคลื่นกระแส รูปคลื่นแรงดัน และค่าความส่องสว่าง ผลการศึกษาพบว่าหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงทั้ง 3 ชนิด มีคุณลักษณะของ รูปคลื่นกระแส รูปคลื่นแรงดัน คล้ายคลึงกัน และหลอดโซเดียมความดันสูงมีความสว่างสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับหลอดชนิดอื่น

Project Title	The Study Effect of Using High Intensity Discharge Lamps
Name	Mr.Aekkasit Thongsook ID. 45380185
Project Advisor	Mr.Somporn Ruangsinchaiwanich (Ph.D.)
Major	Electrical Engineering
Department	Electrical and Computer Engineering
Academic Year	2009

ABSTRACT

This project is to study the principle of the high intensity discharge lamps (HID lamps) for example the High pressure mercury lamp, Metal halide lamp and High pressure sodium lamps. Particularly, main object is focused in staring conditions of the HID lamps, current waveform, voltage waveform, and luminaries volumes. Consequently, the results have shown that the HID lamps have similar current and voltage waveform characteristics, also the luminaries of the High pressure sodium lamp is the highest comparing with other lamps.

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำใคร่ขอแสดงความขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่ออาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช ที่ได้กรุณาให้โอกาส ท่านเสดงให้ข้าพเจ้าเห็นว่าคนทุกคนย่อมสมควรได้รับโอกาสให้กลับตัว แล้วท่านยังให้แนวความคิด ช่วยชี้แนะแนวทางในการทำโครงงาน ตลอดจนกรุณาเอื้อเฟื้อเวลา สถานที่ เอกสารและอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำโครงงาน อีกทั้งช่วยแนะนำแหล่งข้อมูลในการค้นคว้าเพิ่มเติม ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากต่อผู้จัดทำโครงงาน

ขอขอบคุณคณะกรรมการทั้งสองท่าน ได้แก่ อาจารย์แสงชัย มังกรทอง และ ดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห ที่ได้สละเวลามาเป็นกรรมการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ จนโครงงานนี้สำเร็จ

ขอบคุณบิดาและมารดาของข้าพเจ้าที่เลี้ยงดู ส่งเสียค่าเล่าเรียน ให้กำเนิด สั่งสอน ให้อภัย ฯลฯ

ขอบคุณ ดร.ชัยรัตน์ พินทอง ที่คอยเป็นกำลังใจให้ผมเสมอมา

ขอบใจเพื่อนๆ ทุกๆ คน ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาเวลาข้าพเจ้ารู้สึกโดดเดี่ยวไม่มีใครหาทางออกไม่ได้ หรือสับสนกับปัญหาชีวิต

ขอบใจน้องหอย น้องเอก ที่ช่วยเหลือเรื่องการทดลองในโครงงานนี้

ข้าพเจ้าจะไม่มีวันลืมบุญคุณในครั้งนี้ ขอบคุณครับ

ผู้จัดทำโครงงาน

นายเอกสิทธิ์ ทองสุข

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ข

กิตติกรรมประกาศ ค

สารบัญ ง

สารบัญตาราง ช

สารบัญรูป ฌ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 1

1.3 ขอบข่ายของโครงงาน 1

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 1

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.6 งบประมาณที่ใช้ 2

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

2.1 หลอดแสงจันทร์ (High Pressure Mercury lamp) 3

2.1.1 ลักษณะการทำงานของหลอดแสงจันทร์ 4

2.1.2 บัลลาสต์ที่ใช้กับหลอดแสงจันทร์ 4

- บัลลาสต์แบบขดลวด (Reactor Ballast) 5

- บัลลาสต์แบบล้าหลัง (Lag Ballast) 5

- บัลลาสต์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (Regulator Ballast) 6

- บัลลาสต์รักษาระดันแรงดันไฟฟ้าแบบใช้หม้อแปลงขดเดียว 7

2.1.3 หลอดแสงจันทร์ชนิดไม่ใช้บัลลาสต์ (Blended Light Lamp) 10

2.2 หลอดเมทัลฮาไลด์ (Metal Halide Lamp) 11

2.2.1 ลักษณะการทำงานของหลอด 12

2.2.2 บัลลาสต์ที่ใช้กับหลอดเมทัลฮาไลด์ 12

บัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดัน (Regulator Ballast) 13

บัลลาสต์แบบล้าหลัง (Lag Ballast) 13

บัลลาสต์แบบนำค่าสูงโดยใช้หม้อแปลงขดเดียว 14

หน้า

บัลลาสต์แบบขดลวด (Reactor Ballast) 14

2.2.3 ตัวจุดหลอด (Igniter) 15

2.3 หลอดโซเดียมความดันสูง (High Pressure Sodium Lamp) 17

2.3.1 ลักษณะการทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูง 17

2.3.2 บัลลาสต์ที่ใช้กับหลอดโซเดียมความดันสูง 18

บัลลาสต์แบบขดลวด (Reactor Ballast) 18

บัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (Regulator Ballast) 19

บัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยแม่เหล็ก 19

2.3.3 ตัวจุดหลอด (Igniter) 20

2.4 โคมไฟที่ใช้กับหลอดปล่อยประจุความเข้มสูง 24

2.4.1 โคมไฮเบย์ (High bay) 24

2.4.2 โคมโลเบย์ (Low Bay) 24

บทที่ 3 ขั้นตอนการศึกษาและการดำเนินงาน

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ 26

3.2 ขั้นตอนการทดลอง 26

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองวัดแรงดันและกระแส 27

4.1.1 หลอดแสงจันทร์ 27

4.1.2 หลอดเมทัลฮาไลด์ 28

4.1.3 หลอดโซเดียมความดันสูง 30

4.2 ผลการทดลองวัดแรงดันและกระแสที่อุณหภูมิต่างๆ 31

4.2.1 หลอดแสงจันทร์ 31

4.2.2 หลอดเมทัลฮาไลด์ 38

4.2.3 หลอดโซเดียมความดันสูง 45

4.3 เปรียบเทียบแรงดันและกระแสของอุณหภูมิต่างๆ 52

4.3.1 หลอดแสงจันทร์ 53

4.3.2 หลอดเมทัลฮาไลด์ 55

4.3.3 หลอดโซเดียมความดันสูง 57

4.4 ผลการวัดค่าความส่องสว่าง 59

หน้า

บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลของโครงงาน

5.1 วิเคราะห์แรงดันและกระแส 60

5.2 วิเคราะห์แรงดันและกระแสที่อุณหภูมิต่างๆ 60

5.3 วิเคราะห์ค่าความส่องสว่าง 60

5.4 สรุปผลของโครงงาน 60

5.5 ข้อเสนอแนะ 60

เอกสารอ้างอิง 61

ภาคผนวก

ประวัติผู้เขียนโครงงาน

มหาวิทยาลัยนเรศวร

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลทั่วไปของหลอดแสงจันทร์ 7

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของหลอดแสงจันทร์ประเภทใช้บัลลาสต์ 8

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของหลอดแสงจันทร์ประเภทไม่ใช้บัลลาสต์ 10

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลทั่วไปของหลอดเมทัลฮาไลด์ 15

ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของหลอดเมทัลฮาไลด์ 16

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของหลอดเมทัลฮาไลด์แบบใช้บัลลาสต์ของหลอดแสงจันทร์ 16

ตารางที่ 2.7 ข้อมูลทั่วไปของหลอดโซเดียมความดันสูง 21

ตารางที่ 2.8 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของหลอดโซเดียมความดันสูง 22

ตารางที่ 2.9 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของหลอดโซเดียมความดันสูงแบบพิเศษ
ชนิดใช้กับบัลลาสต์ของหลอดแสงจันทร์ 23

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 หลอดแสงจันทร์ 4

รูปที่ 2.2 วงจรการทำงานของหลอดแสงจันทร์กับบัลลาสต์แบบขดลวด 5

รูปที่ 2.3 วงจรการทำงานของหลอดแสงจันทร์กับบัลลาสต์แบบล้าหลัง 6

รูปที่ 2.4 วงจรการทำงานของหลอดแสงจันทร์กับบัลลาสต์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า 6

รูปที่ 2.5 วงจรการทำงานของหลอดแสงจันทร์กับบัลลาสต์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า
แบบใช้หม้อแปลงขดเดียว 7

รูปที่ 2.6 หลอดแสงจันทร์ชนิดไม่ใช้บัลลาสต์หรือหลอดแสงจันทร์แสงผสม 10

รูปที่ 2.7 หลอดเมทัลฮาไลด์ 11

รูปที่ 2.8 วงจรการทำงานของหลอดเมทัลฮาไลด์กับบัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดัน 13

รูปที่ 2.9 วงจรการทำงานของหลอดเมทัลฮาไลด์กับบัลลาสต์แบบล้าหลัง 13

รูปที่ 2.10 วงจรการทำงานของหลอดเมทัลฮาไลด์กับบัลลาสต์แบบนำค่าสูง
โดยใช้หม้อแปลงขดเดียว 14

รูปที่ 2.11 วงจรการทำงานของหลอดเมทัลฮาไลด์กับบัลลาสต์แบบขดลวด 14

รูปที่ 2.12 Superimposed Igniter 15

รูปที่ 2.13 หลอดโซเดียมความดันสูง 17

รูปที่ 2.14 วงจรการทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูงกับบัลลาสต์แบบขดลวด 18

รูปที่ 2.15 วงจรการทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูงกับบัลลาสต์แบบ 19

รูปที่ 2.16 วงจรการทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูงกับบัลลาสต์
แบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยแม่เหล็ก 19

รูปที่ 2.17 ลักษณะวงจรของ Superimposed Igniter 20

รูปที่ 2.18 ลักษณะวงจรของ Pulse Igniter ทั้งสามแบบ 20

รูปที่ 2.19 โคมไฮเบย์ 24

รูปที่ 2.20 โคมโลเบย์ 24

รูปที่ 2.21 รูปแบบแสงต่างๆ ที่ออกมาจากโคม 25

รูปที่ 4.1 วงจรหลอดแสงจันทร์ที่ใช้ในการทดลอง 27

รูปที่ 4.2 วงจรหลอดแสงจันทร์ 27

รูปที่ 4.3 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดแสงจันทร์ 27

รูปที่ 4.4 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ 28

รูปที่ 4.5 วงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ใช้ในการทดลอง 28

หน้า

รูปที่ 4.6 วงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ 29
รูปที่ 4.7 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ 29
รูปที่ 4.8 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ 29
รูปที่ 4.9 วงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ใช้ทดลอง 30
รูปที่ 4.10 วงจรหลอดโซเดียมความดันสูง 30
รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูง 30
รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูง 31
รูปที่ 4.13 หลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 15°C 31
รูปที่ 4.14 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 15°C 32
รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 15°C 32
รูปที่ 4.16 หลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 20°C 33
รูปที่ 4.17 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 20°C 33
รูปที่ 4.18 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 20°C 33
รูปที่ 4.19 หลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 25°C 34
รูปที่ 4.20 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 25°C 34
รูปที่ 4.21 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 25°C 35
รูปที่ 4.22 หลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 30°C 35
รูปที่ 4.23 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 30°C 35
รูปที่ 4.24 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 30°C 36
รูปที่ 4.25 หลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 35°C 36
รูปที่ 4.26 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 35°C 37
รูปที่ 4.27 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 35°C 37
รูปที่ 4.28 หลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 15°C 38
รูปที่ 4.29 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 15°C 38
รูปที่ 4.30 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 15°C 39
รูปที่ 4.31 หลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 20°C 39
รูปที่ 4.32 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 20°C 39
รูปที่ 4.33 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 20°C 40
รูปที่ 4.34 หลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 25°C 40
รูปที่ 4.35 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 25°C 41
รูปที่ 4.36 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 25°C 41

หน้า

รูปที่ 4.37 หลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 30°C 42
รูปที่ 4.38 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 30°C 42
รูปที่ 4.39 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 30°C 43
รูปที่ 4.40 หลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 35°C 43
รูปที่ 4.41 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 35°C 44
รูปที่ 4.42 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 35°C 44
รูปที่ 4.43 หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 15°C 45
รูปที่ 4.44 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 15°C 45
รูปที่ 4.45 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 15°C 46
รูปที่ 4.46 หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 20°C 46
รูปที่ 4.47 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 20°C 47
รูปที่ 4.48 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 20°C 47
รูปที่ 4.49 หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 25°C 48
รูปที่ 4.50 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 25°C 48
รูปที่ 4.51 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 25°C 49
รูปที่ 4.52 หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 30°C 49
รูปที่ 4.53 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 30°C 50
รูปที่ 4.54 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 30°C 50
รูปที่ 4.55 หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 35°C 51
รูปที่ 4.56 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 35°C 51
รูปที่ 4.57 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 35°C 52
รูปที่ 4.58 ผลการวัดแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ของหลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิต่างๆ 52
รูปที่ 4.59 ผลการวัดแรงดันที่ตกคร่อมหลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิต่างๆ 53
รูปที่ 4.60 ผลการวัดกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ของหลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิต่างๆ 53
รูปที่ 4.61 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสที่ไหลเข้าหลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิต่างๆ 54
รูปที่ 4.62 ผลการวัดแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ของหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิต่างๆ 54
รูปที่ 4.63 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันที่ตกคร่อมหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิต่างๆ 55
รูปที่ 4.64 ผลการวัดกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ของหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิต่างๆ 55
รูปที่ 4.65 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสที่ไหลเข้าหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิต่างๆ 56
รูปที่ 4.66 ผลการวัดแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิต่างๆ 56
รูปที่ 4.67 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันที่ตกคร่อมหลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิต่างๆ 57

หน้า

รูปที่ 4.68 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิต่างๆ 57
รูปที่ 4.69 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสที่ไหลเข้าหลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิต่างๆ 58
รูปที่ 4.70 แผนภูมิแสดงผลการวัดความส่องสว่างของหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงทั้ง 3 ชนิด 58

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

แสงสว่างเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการใช้ชีวิตประจำวัน โดยทุกเวลาเราต้องการแสงสว่างในการทำกิจกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นภายนอกอาคารหรือภายในอาคารเพื่อใช้ในการมองเห็น ทุกวันนี้จำนวนประชากรในประเทศมีอัตราการเพิ่มขึ้นมีการก่อสร้างบ้านเรือน อาคาร และโรงงานต่างๆ เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องการใช้แสงสว่างเพิ่มขึ้นเมื่อต้องการแสงสว่างเพิ่มขึ้นจึงใช้ไฟฟ้าในการให้แสงสว่างเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาวงจรการทำงานของหลอดปล่อยประจุความเข้มสูง

1.2.2 เพื่อศึกษาการทำงานของหลอดไฟที่อุณหภูมิต่างๆ

1.2.3 เพื่อศึกษาค่าความส่องสว่างของหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงแต่ละชนิด

1.2.4 สามารถวิเคราะห์แผนภูมิของกระแสและแรงดันได้

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1.3.1 เลือกใช้อุปกรณ์มาต่อวงจรให้เหมาะสมกับการใช้งานของหลอดไฟแต่ละชนิด

1.3.2 ศึกษาตรวจวัด แรงดันและกระแสของวงจรหลอดไฟแต่ละชนิดที่อุณหภูมิต่างๆ

1.3.3 ศึกษาและตรวจวัดความส่องสว่างของหลอดไฟแต่ละชนิด

1.3.4 ศึกษาและเปรียบเทียบผลการทดลองจากแผนภูมิ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

กิจกรรม	2552			
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
รวบรวมข้อมูล	←	→		
ออกแบบระบบ		←	→	
แก้ไขข้อผิดพลาด		←	→	
สรุปและนำเสนอรายงาน			←	→

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถต่อวงจรหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงแต่ละชนิดได้อย่างถูกต้อง

1.5.2 สามารถใช้เครื่องมือวัดชนิดต่างๆ ได้

1.5.3 มีความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์แผนภูมิของกระแส แรงดัน และค่าความส่องสว่าง

1.6 งบประมาณที่ใช้

- อุปกรณ์	200	บาท
- เอกสาร	600	บาท
- อื่นๆ	200	บาท
- รวม	1,000	บาท

(หนึ่งพันบาทถ้วน)

มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

หลอดปล่อยประจุความเข้มสูง (High Intensity Discharge Lamps) คือ หลอดไฟฟ้าแบบใหม่ที่แหล่งกำเนิดแสงเล็ก แต่ฟลั๊กซ์การส่องสว่างและประสิทธิภาพสูง มีขนาดกะทัดรัด ทำให้การออกแบบดวงโคมทำได้ง่าย ทำงานด้วยหลักการปล่อยประจุความเข้มสูง เป็นหลอดที่มีค่าประสิทธิภาพความส่องสว่างสูงกว่าหลอดชนิดอื่น มีขนาดกะทัดรัด ติดตั้งง่าย และส่องสว่างควบคุมออกไปได้ไกล จึงเป็นหลอดไฟฟ้าที่เหมาะสมกับงานในโรงงานอุตสาหกรรม สนามกีฬา หรือตลอดจนเสาไฟฟ้าตามถนน หลอดไฟชนิดนี้จะต้องใช้ควบคู่ไปกับดวงโคมเสมอ

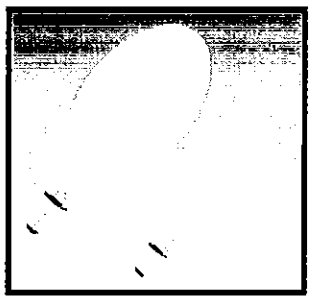
เมื่อเริ่มทำงาน หลอดปล่อยประจุความเข้มสูงนี้ จะไม่สว่างขึ้นเต็มที่ในทันที เมื่อก๊าซที่อยู่ภายในหลอดเกิดการแตกตัวหรือทำงาน ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที แล้วแต่ชนิดของหลอดด้วย จึงจะให้แสงสว่างอย่างเต็มที่ และในขณะที่ใช้งานอยู่ หากเกิดไฟฟ้าดับทันทีทันใด แล้วจะทำการจุดหลอดซ้ำอีกครั้ง เพื่อให้หลอดทำงานใหม่นั้น หลอดจะไม่สามารถทำงานใหม่ได้ในตอนนั้น ต้องรอเวลาให้หลอดเย็นตัวลงเสียก่อน ซึ่งนั่นหมายความว่า จะต้องให้ก๊าซในหลอดที่แตกตัวไปกลับคืนมารวมกันเสียก่อนเหมือนในตอนเริ่มสตาร์ทหลอด แล้วจึงเริ่มจุดหลอดใหม่ได้ อาจจะใช้เวลา 5-10 นาที ขึ้นอยู่กับชนิดของหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงแต่ละหลอดด้วย

หลอดปล่อยประจุความเข้มสูง สามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

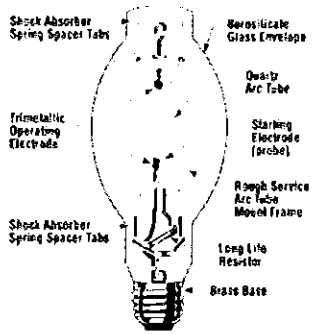
- หลอดแสงจันทร์ (High Pressure Mercury Lamp)
- หลอดเมทัลฮาไลด์ (Metal Halide Lamp)
- หลอดโซเดียมความดันสูง (High Pressure Sodium Lamp)

2.1 หลอดแสงจันทร์ (High Pressure Mercury lamp)

หลอดแสงจันทร์เป็นหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงชนิดแรกที่ถูกประดิษฐ์ขึ้น หลอดชนิดนี้จะให้แสงสีขาวนวล มีประสิทธิภาพความส่องสว่างไม่สูงมากนัก คือประมาณ 35-60 ลูเมนต่อวัตต์ จึงนิยมใช้ส่องสว่างเป็นไฟในโรงงาน ไฟถนนในซอย ห้างสรรพสินค้า อาคารที่มีเพดานสูง เป็นต้น มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 24,000 ชั่วโมง หลอดแสงจันทร์ที่ผลิตขึ้นมามีขนาดตั้งแต่ 40 วัตต์ไปจนถึง 1,000 วัตต์ หลอดแสงจันทร์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้มีอยู่ 2 ชนิดด้วยกันคือ ชนิดที่ใช้งานร่วมกับบัลลาสต์ กับ ชนิดที่ไม่มีบัลลาสต์ ซึ่งชนิดที่ไม่มีบัลลาสต์นี้จะมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าคือมีอายุการใช้งานประมาณ 16,000 ชั่วโมง



ลักษณะภายนอก[1]



โครงสร้างของหลอดแสงจันทร์[2]

รูปที่ 2.1 หลอดแสงจันทร์

2.1.1 ลักษณะการทำงาน

เมื่อเริ่มป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับหลอดแสงจันทร์ แรงดันไฟฟ้านี้จะไปตกคร่อมที่ปลายของอิเล็กโทรดหลัก (Main Electrode) และอิเล็กโทรดที่ช่วยในการจุดหลอด (Starting Electrode) ซึ่งอยู่ที่ปลายด้านล่างของหลอด ทำให้เกิดการของก๊าซอากอน และเกิดความร้อนและแสงสว่างขึ้นตามลำดับ เรียกเหตุการณ์นี้ว่า ช่วงเวลาอุ่นไส้หลอด (Warm-up Time) ความร้อนที่ได้นี้จะทำให้ไอของปรอทแตกตัวออก ความต้านทานภายในหลอดจะตกลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงจุดจุดหนึ่ง ซึ่งแรงดันไฟฟ้าของบัลลาสต์สามารถเอาชนะความต้านทานระหว่างปลายอิเล็กโทรดหลักทั้งสองข้างได้ กระแสไฟฟ้าก็จะเริ่มไหลจากอิเล็กโทรดหลักข้างหนึ่งไปยังปลายอีกข้างหนึ่ง ไอปรอทก็จะเริ่มแตกตัวมากขึ้น จนถึงจุดอิ่มตัว (Steady State) ความต้านทานของหลอดขณะนี้จะมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับอิเล็กโทรดที่ช่วยในการจุดหลอด และจากนี้ไปก็จะไม่มีไฟฟ้าที่ไหลผ่านจากอิเล็กโทรดหลักที่อิเล็กโทรดช่วยในการจุดหลอดอีกเลย ระยะเวลาช่วงนี้นับจากเริ่มป้อนแรงดันให้กับหลอดแสงจันทร์จนกระทั่งถึงช่วงที่หลอดสามารถเปล่งแสงสว่างออกมานี้เราเรียกว่า ช่วงเวลาจุดหลอด (Run up time) หลอดแก้วชั้นนอกของหลอดแสงจันทร์อาจเป็นหลอดแก้วชนิดใส (Clear Glass) หรือเป็นแบบที่มีสารเรืองแสงเคลือบผิวในก็ได้ คุณสมบัติทางไฟฟ้าตลอดจนลักษณะการทำงานของหลอดไม่แตกต่างกันเลย

2.1.2 บัลลาสต์ที่ใช้กับหลอดแสงจันทร์

บัลลาสต์จะทำหน้าที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดหลักที่กระเปาะแก้วด้านใน แล้วจะทำให้ก๊าซที่อยู่ในนั้นเกิดการแตกตัว และหลอดก็จะเปล่งแสงออกมา เมื่อหลอดเปล่งแสงออกมาเรียบร้อยแล้วบัลลาสต์ก็จะทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสไม่ให้ไหลเข้าไปในหลอดมากจนเกินไป

โดยทั่วไปแล้ว บัลลาสต์จะถูกออกแบบไว้เพื่อใช้งานสำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความถี่ที่ถูกกำหนดเอาไว้ และเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง (Voltage Dip) จะส่งผลโดยตรงต่อการทำงานของบัลลาสต์และหลอดไฟ ซึ่งอาจจะทำให้หลอดนั้นเสียหายได้ ปัจจุบันมีการออกแบบบัลลาสต์บางชนิดให้สามารถใช้งานได้ตามปกติ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าไป ±10%

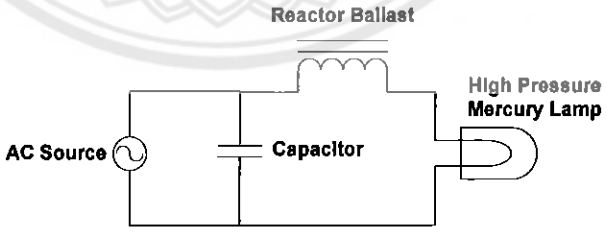
การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้านั้น ส่วนใหญ่แล้วจะมีสาเหตุมาจาก ปริมาณของโหลดบริเวณใกล้เคียง การตกลงของแรงดันไฟฟ้าแต่ละครั้งอาจเกิดเพียงครู่เท่านั้น ซึ่งจะมีผลทำให้แสงสว่างของหลอดลดลงเพียงเล็กน้อย หรือบางครั้งอาจตกลงมามากและนานจนทำให้หลอดไฟดับลง ดังนั้นในการออกแบบระบบแสงสว่างจึงจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงขีดความสามารถของบัลลาสต์ ตลอดจนต้องศึกษาบริเวณใกล้เคียงถึงสภาพระบบไฟฟ้า ก่อนที่จะเลือกชนิดของบัลลาสต์

โดยทั่วไปแล้วบัลลาสต์จะมีค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ต่ำประมาณ 30% ถึง 50% แต่ก็สามารถปรับให้สูงขึ้นได้โดยการต่อตัวเก็บประจุ (Capacitor) ขนานเข้ากับวงจรของหลอดแสงจันทร์ บัลลาสต์ที่มีค่าตัวประกอบกำลังสูงๆ หมายความว่า มีประสิทธิภาพสูงไปด้วย ส่วนตัวที่มีค่าตัวประกอบกำลังต่ำนั้น หากไม่มีการแก้ไขแล้วจำทำให้กระแสไหลเข้าไปในวงจรมากเกิน ทำให้จำต้องให้อุปกรณ์ต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของวงจรมีขนาดใหญ่ขึ้น ตามไปด้วย เช่น สายไฟ สวิตช์ เป็นต้น ประเภทของบัลลาสต์ที่ใช้กับหลอดแสงจันทร์โดยทั่วไปจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

- บัลลาสต์แบบปกติ (Normal Ballast)
  - บัลลาสต์แบบขดลวด (Reactor Ballast)
  - บัลลาสต์แบบล้าหลัง (Lag Ballast)
- บัลลาสต์ที่มีกำลังไฟฟ้าคงที่ (Constant Wattage Ballast)
  - บัลลาสต์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (Regulator Ballast)
  - บัลลาสต์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแบบใช้หม้อแปลงขดเดียว (Auto Regulator Ballast)

บัลลาสต์แบบขดลวด (Reactor Ballast)

เป็นบัลลาสต์ที่มีลักษณะคล้ายกับบัลลาสต์ทั่วไปๆ โดยจะมีขดลวดทองแดงพันอยู่บนแกนเหล็ก (Core) และจะต่ออนุกรมอยู่กับหลอดขณะใช้งาน ดังรูปที่ 2.2



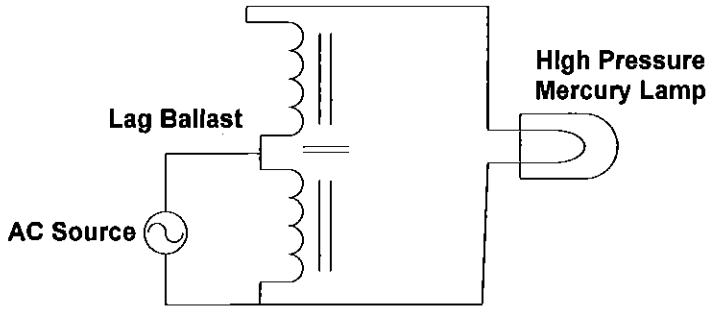
รูปที่ 2.2 วงจรการทำงานของหลอดแสงจันทร์กับบัลลาสต์แบบขดลวด

คุณสมบัติของบัลลาสต์แบบขดลวด (Reactor Ballast)

- มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และราคาถูก
- ค่าตัวประกอบกำลังต่ำ
- แรงดันระหว่างสายจะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±5%
- กระแสไฟฟ้าเริ่มต้น (Starting Current) มีค่าประมาณ 150%

บัลลาสต์แบบล้าหลัง (Lag Ballast)

เป็นบัลลาสต์ที่สร้างขึ้นโดยเอาแนวความคิดของการรวมเอาบัลลาสต์แบบขดลวด (Reactor Ballast) กับหม้อแปลงขดเดียว (Auto Transformer) เข้าด้วยกัน



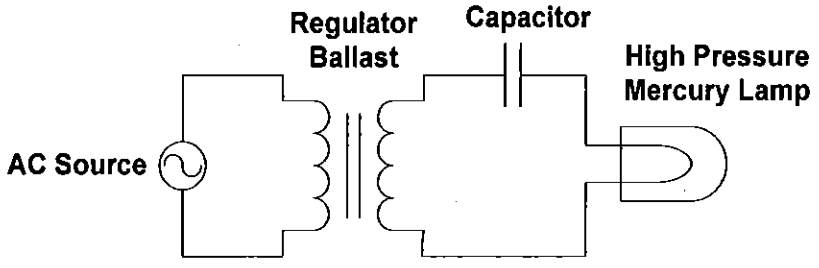
รูปที่ 2.3 วงจรการทำงานของหลอดแสงจันทร์กับบัลลาสต์แบบล้าหลัง

คุณสมบัติของบัลลาสต์แบบล้าหลัง (Lag Ballast)

- มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก และราคาแพงกว่าบัลลาสต์แบบขดลวด
- ใช้งานได้ดีแม้ว่าแรงดันระหว่างสายจะสูงกว่าหรือต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่หลอดต้องการ
- ค่าตัวประกอบกำลังต่ำ
- ประสิทธิภาพต่ำกว่าบัลลาสต์แบบขดลวด

บัลลาสต์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (Regulator Ballast)

เป็นบัลลาสต์ที่สร้างขึ้นมามีขดลวดอยู่ 2 ชุด และขดลวดนี้จะพันอยู่บนแกนเหล็ก มีลักษณะเหมือนหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งขดลวดทั้งสองชุดนี้จะพันแยกออกจากัน ขดลวดชุดที่ 2 ทำหน้าที่เป็นขดลวดทุติยภูมิจะทำงานอยู่ในช่วงสภาพการอิ่มตัวของแกนเหล็ก (Magnetic Saturation) จึงสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ไหลในวงจรให้คงที่ และคาปาซิเตอร์ตัวที่ต่ออนุกรมอยู่กับบัลลาสต์จะทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในวงจรของหลอด ส่วนอีกตัวหนึ่งที่ต่อขนานกับบัลลาสต์ด้านขดลวดทุติยภูมิซึ่งเรียกว่า ตัวเก็บประจุค่าสูงสุด (Peaking Capacitor) จะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าของวงจรเปิด (Open Circuit Voltage) ในกรณีที่หลอดไฟจะต้องสตาร์ทที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ลักษณะของวงจรบัลลาสต์ชนิดนี้



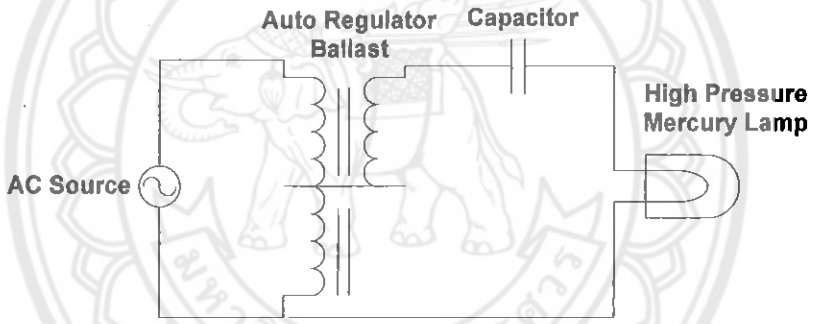
รูปที่ 2.4 วงจรการทำงานของหลอดแสงจันทร์กับบัลลาสต์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

คุณสมบัติของบัลลาสต์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

- รักษาระดับของกระแสไฟฟ้าให้คงที่ได้ดีมาก ถึงแม้ว่าค่าแรงดันของสายปฐมภูมิจะเปลี่ยนแปลงมากถึง ±5% ก็ตาม
- กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสตาร์ทต่ำกว่ากระแสเมื่อช่วงที่หลอดทำงานปกติ
- ค่าตัวประกอบยอดคลื่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 1.8 ถึง 2.0
- ราคาแพงกว่าบัลลาสต์แบบขดลวดมาก
- สามารถใช้กับแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานกับหลอดแสงจันทร์ได้ทุกขนาด

บัลลาสต์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแบบใช้หม้อแปลงขดเดียว (Auto Regulator Ballast)

เป็นบัลลาสต์ที่สร้างขึ้นมา โดยนำเอาคุณสมบัติของบัลลาสต์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (Regulator Ballast) กับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบขดเดียวมารวมเข้าด้วยกัน และจะเห็นว่าส่วนหนึ่งของขดลวดทางด้านปฐมภูมิจะทำหน้าที่เป็นขดลวดชุดทุติยภูมิและขดลวดทั้งสองชุดนี้จะไม่แยกวงจรไฟฟ้าออกจากกันเป็นสาเหตุที่ทำให้มีขีดความสามารถในการรักษาแรงดันไฟฟ้า (Regulator) ต่ำกว่าบัลลาสต์

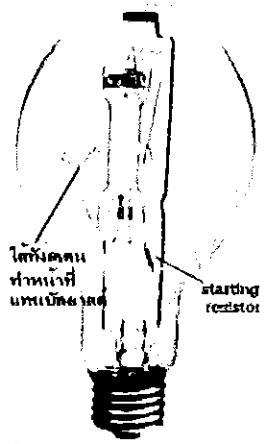


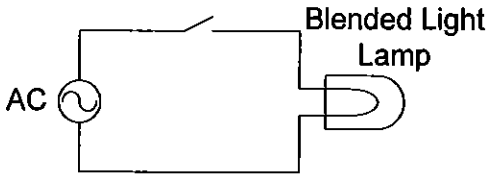
รูปที่ 2.5 วงจรการทำงานของหลอดแสงจันทร์กับบัลลาสต์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแบบใช้หม้อแปลงขดเดียว

คุณสมบัติของบัลลาสต์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแบบใช้หม้อแปลงขดเดียว

- มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และราคาถูกว่าบัลลาสต์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า
- มีประสิทธิภาพสูงกว่าบัลลาสต์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า
- มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากกว่าบัลลาสต์ขดลวด
- แรงดันระหว่างสายสามารถเปลี่ยนแปลงได้ถึง ±10% และกำลังของหลอดไฟ (Lamp Watt) เปลี่ยนแปลงน้อยมาก
- กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสตาร์ตจะต่ำกว่ากระแสไฟฟ้าในช่วงที่หลอดทำงานปกติ

2.1.3 หลอดแสงจันทร์ชนิดไม่ใช้บัลลาสต์ (Blended Light Lamp)





ลักษณะภายนอก [4] ลักษณะวงจร

รูปที่ 2.6 หลอดแสงจันทร์ชนิดไม่ใช้บัลลาสต์หรือหลอดแสงจันทร์แสงผสม

ลักษณะการทำงานของหลอดแสงจันทร์ชนิดไม่ใช้บัลลาสต์

หลอดแสงจันทร์ชนิดไม่ใช้บัลลาสต์ หรือ หลอดแสงจันทร์แสงผสมนี้ จะมีไส้หลอดทังสเตนต่ออนุกรมอยู่กับหลอดทำหน้าที่แทนบัลลาสต์อยู่ภายในแสงที่ได้จากหลอดจะเกิดจากการปล่อยประจุของปรอทผสมกับแสงที่ได้จากการเผาไส้หลอด หลอดแสงจันทร์ชนิดไม่ใช้บัลลาสต์ที่ใช้ทั่วไป จะมีลักษณะเป็นหลอดรูปทรงไข่เคลือบสารฟอสเฟอร์ และมีคุณสมบัติดังนี้

- มีประสิทธิภาพความส่องสว่างต่ำ ประมาณ 10-26 ลูเมนต่อวัตต์
- อายุการใช้งานยาวกว่าหลอดไส้ ประมาณ 5,000-8,000 ชั่วโมง
- แสงที่ออกมาจากหลอดจะคล้ายหลอดแสงจันทร์ แต่จะมีสีแดงของหลอดไส้ด้วย
- ดัชนีความถูกต้องสีสูง ถึง 60
- อุณหภูมิสี 3,600 องศาเคลวิน

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลทั่วไปของหลอดแสงจันทร์ [3]

กำลังไฟฟ้า (W)	ฟลั๊กซ์การส่องสว่าง (lm)	ประสิทธิภาพความส่องสว่าง (lm/W)	อุณหภูมิสี (K)
Standard			
50	1,800	36	4,200
80	3,800	48	4,100
125	6,300	50	4,000
250	13,000	52	3,900
400	22,000	55	3,800
700	38,500	55	3,550
1,000	58,000	58	3,550
Deluxe			
50	1,600	32	3,000
80	3,400	43	3,000
125	5,700	46	3,000
250	14,000	56	3,100
400	24,000	60	3,000
Blended			
100	1,100	11	3,300
160	3,100	19	3,600
250	5,500	22	3,400
500	13,000	26	3,700

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของหลอดแสงจันทร์ประเภทใช้บัลลาสต์ [3]

กำลังไฟฟ้า (W)	ประเภท	ขั้วหลอด และ แรงดัน (V)	อุณหภูมิสี (K)	ดัชนีความถูกต้องสี (CRI)	ฟลักซ์การส่องสว่าง (lm)	กำลังสูญเสียบัลลาสต์ (W)	อายุการใช้งาน (ชั่วโมง)
50	H	E27&B22 (220V)	5,700	25	1,650	9	8,000
	HF		4,100	40	1,900		
	HF-R		4,100	40	1,300		
	HF-G		4,100	40	1,750		
80	H	E27&B22 (220V)	5,700	25	3,000	10	16,000
	HF		4,100	40	3,600		
	HF-R		4,100	40	2,500		
	HF-G		4,100	40	3,600		
125	H	E27&B22 (220V)	5,700	25	5,400	14	24,000
	HF		4,100	40	6,250		
	HF-R		4,100	40	4,300		
	HF-G		4,100	40	6,250		
175	H	E40 (220V)	5,700	25	7,800	16	24,000
	HF		4,100	40	8,900		
250	H	E40 (220V)	5,700	25	12,000	18	24,000
	H-T		5,700	25	11,500		
	H-R		5,700	25	8,000		
	HF		4,100	40	13,700		
	HF-R		4,100	40	8,800		
	HF-G		4,100	40	12,800		
400	H	E40 (220V)	5,700	25	21,000	22	24,000
	H-T		5,700	25	21,000		
	H-R		5,700	25	13,500		
	HF		4,100	40	23,000		
	HF-R		4,100	40	15,500		
700	H	E40 (220V)	5,700	25	39,500	34	24,000
	H-R		5,700	25	25,000		
	HF		4,100	40	44,000		
	HF-R		4,100	40	31,000		
1,000	H	E40 (220V)	5,700	25	58,000	45	16,000
	H-R		5,700	25	36,600		
	HF		4,100	40	64,000		
	HF-R		4,100	40	46,000		
2,000	HF	E40 (380V)	4,100	40	125,000	60	10,000

หมายเหตุ

- H: หลอดแก้วใส ทรงบีที หรือทรงอีลิป
- H-T: หลอดแก้วใส ทรงหลอดยาว
- H-R: หลอดแก้วใส ทรงสปอร์ไลท์
- HF: หลอดแก้วเคลือบสาร ทรงบีที หรือทรงอีลิป
- HF-R: หลอดแก้วเคลือบสาร ทรงสปอร์ทไลท์
- HF-G: หลอดแก้วเคลือบสาร ทรงหลอดกลม

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของหลอดแสงจันทร์ประเภทไม่ใช้บัลลาสต์ [3]

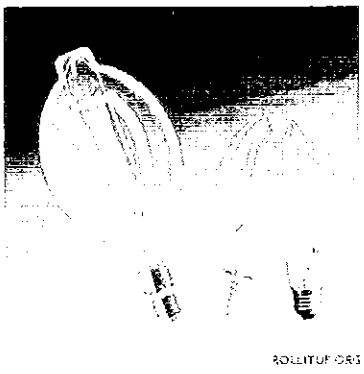
กำลังไฟฟ้า (W)	ประเภท	ขั้วหลอด และแรงดัน (V)	อุณหภูมิสี (K)	ดัชนีความถูกต้องสี (CRI)	ฟลักซ์การส่องสว่าง (lm)	อายุการใช้งาน (ชั่วโมง)
100	SB-W	E27 (220V)	3,700	58	1,100	6,000
160	SB	E27 (220V)	5,500	38	2,400	10,000
	SB-W		3,700	58	3,100	
	SBF-R		3,700	58	1,680	
	SBF-PAR		3,700	58	1,680	
250	SB	E27&E40 (220V)	5,500	38	5,300	12,000
	SB-W		3,700	58	5,700	
	SBF-R		3,700	58	3,900	
500	SB	E40 (220V)	5,500	38	11,000	16,000
	SB-W		3,700	58	14,000	
	SBF-R		3,700	58	9,100	
750	SB	E40 (220V)	5,500	38	19,500	16,000
	SB-W		3,700	58	21,000	
	SBF-R		3,700	58	14,000	
1,000	SB	E40 (220V)	5,500	38	29,000	16,000
	SB-W		3,700	58	21,000	
	SBF-R		3,700	58	20,000	

หมายเหตุ

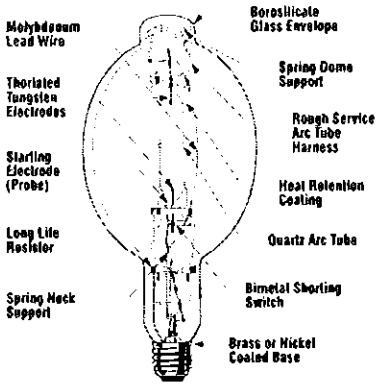
- **SB**: หลอดแก้วใส ทรงบีที หรือทรงอีลิป
- **SB-W**: หลอดแก้วเคลือบสารสีขาว ทรงบีที หรือทรงอีลิป
- **SBF-R**: หลอดแก้วเคลือบสาร ทรงสปอร์ทไลท์
- **SBF-PAR**: หลอดแก้วเคลือบสาร ทรงสปอร์ทไลท์กระจกหนา

2.2 หลอดเมทัลฮาไลด์ (Metal Halide Lamp)

หลอดเมทัลฮาไลด์เป็นหลอดปล่อยประจุความเข้มสูง อีกประเภทหนึ่งที่มีโครงสร้างและการทำงานคล้ายกับหลอดแสงจันทร์มาก แต่มีประสิทธิภาพสูงกว่า และให้ความสมดุลของสีดีกว่า หลอดเมทัลฮาไลด์มีตั้งแต่ขนาด 70 วัตต์ ไปจนถึง 2,000 วัตต์ มีประสิทธิภาพความส่องสว่างอยู่ระหว่าง 60 ถึง 100 ลูเมนต่อวัตต์



ลักษณะภายนอก[5]



โครงสร้างหลอดเมทัลฮาไลด์ [2]

รูปที่ 2.7 หลอดเมทัลฮาไลด์

โครงสร้างของหลอดเมทัลฮาไลด์ จะเห็นได้ว่า มีลักษณะคล้ายคลึงกับหลอดแสงจันทร์มาก แต่ต่างกันตรงที่ว่าภายในหลอดของหลอดเมทัลฮาไลด์นอกจากจะมีปรอทและก๊าซอาร์กอนผสมอยู่แล้ว ยังมีโลหะไอโอไดด์ เช่น โซเดียมไอโอไดด์ อินเดียมไอโอไดด์ ทัลเลียมไอโอไดด์ เป็นต้น ผสมอยู่อีกด้วย การแตกตัวของโลหะไอโอไดด์นี้ จะทำให้เกิดแสงดูสมดุลมากขึ้นตามไปด้วย และไม่จำเป็นต้องเคลือบผิวในหลอดแก้วด้วยสารเรืองแสงชนิดใดๆ ทั้งสิ้น อย่างไรก็ตาม อายุการใช้งานของหลอดจะอยู่ระหว่าง 6,000 ถึง 15,000 ชั่วโมงเท่านั้น ซึ่งน้อยกว่าหลอดแสงจันทร์ถึงเท่าตัว

จากเหตุผลที่ว่า หลอดเมทัลฮาไลด์มีประสิทธิภาพสูงกว่าหลอดแสงจันทร์นั้น จึงสามารถลดจำนวนดวงโคมที่ใช้งานได้อีกด้วย ข้อดีอีกประการหนึ่งของหลอดเมทัลฮาไลด์ก็คือว่า มันจะให้ดัชนีความถูกต้องของสีออกมาใกล้เคียงกับแสงธรรมชาติมาก จึงมีผู้นิยมใช้หลอดแบบนี้ในบริเวณสนามกีฬาที่มักมีการถ่ายทอดสัญญาณโทรทัศน์ โรงงานอุตสาหกรรม ห้างสรรพสินค้า อยู่เสมอ

2.2.1 ลักษณะการทำงานของหลอด

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับหลอดเมทัลฮาไลด์แล้ว ตัวจุดหลอด (Igniter) จะเป็นตัวสร้างพัลส์ที่มีความถี่สูง เพื่อที่จะทำให้บัลลาสต์สร้างแรงดันสูงไปขับหลอด มากพอที่จะทำให้เกิดไอออนขึ้นระหว่างขั้วของหลอดเมทัลฮาไลด์ทั้งสองข้าง เป็นช่วงเริ่มต้นของการอุ่นหลอด ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในลำ พร้อมกับแผ่พลังงานและรังสีประจำตัวออกมา ประกอบไปด้วยรังสีที่มีความยาวคลื่นชนิดต่างๆ มากมาย เป็นช่วงที่ตาคนเรามองเห็นและเป็นช่วงที่ตาคนเราไม่สามารถมองเห็นได้ หรือแม้กระทั่งมีสีของแสงที่เกิดขึ้นต่างๆ กัน มาผสมกันอย่างได้สัดส่วนพอเหมาะ จึงเป็นเหตุที่สีที่ปรากฏออกมาจากหลอดเมทัลฮาไลด์เป็นแสงสีขาว และให้ความถูกต้องของสีได้สูงกว่าหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงชนิดอื่น เมื่อหลอดทำงานแล้ว ตัวจุดหลอดก็จะหมดหน้าที่ไป เหลือแต่บัลลาสต์ตัวเดียวที่จะทำหน้าที่จำกัดปริมาณกระแสและแรงดันไฟฟ้า ที่ไปตกคร่อมตรงหลอด

เนื่องจากหลอดเมทัลฮาไลด์มีการเติมสารพวกไอโอไดด์เข้าไปในหลอดจึงทำให้มีจุดเดือดที่สูงกว่าอุณหภูมิที่ผนังของกระเปาะแก้วด้านใน จึงทำให้บางส่วนของสารที่เติมเข้าไปนั้นยังคงกลั่นตัวอยู่

ในสภาพที่เป็นของแข็งและปริมาณของสารไอโอไดด์ของธาตุต่างๆ ในสภาวะที่จะกลายเป็นไอจะถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิของจุดเย็นสุดในผนังภายในกระเปาะแก้วด้านใน ซึ่งเป็นคุณสมบัติของหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ไม่เหมือนหลอดชนิดอื่น

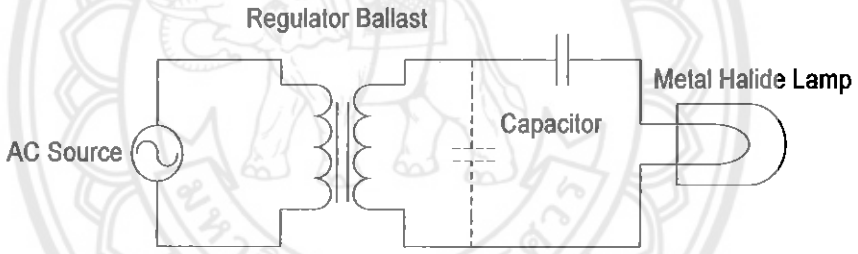
2.2.2 บัลลาสต์ที่ใช้กับหลอดเมทัลฮาไลด์

ในการทำงานของหลอดเมทัลฮาไลด์ นอกจากจะมีตัวจุดหลอดประกอบอยู่ในวงจรเพื่อช่วยสร้างพัลส์แล้ว จะต้องมีบัลลาสต์ประกอบอยู่ในวงจรด้วย จึงทำให้วงจรของหลอดไฟทำงานได้ ซึ่งบัลลาสต์ที่นิยมใช้กันทั่วไปสำหรับหลอดเมทัลฮาไลด์ มีดังนี้

- บัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดัน (Regulator Ballast)
- บัลลาสต์แบบล้าหลัง (Lag Ballast)
- บัลลาสต์แบบนำค่าสูงโดยใช้หม้อแปลงขดเดียว (Lead Peak Autotransformer Ballast)
- บัลลาสต์แบบขดลวด (Reactor Ballast)

บัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดัน (Regulator Ballast)

เป็นบัลลาสต์ที่สร้างขึ้นมา มีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงและมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมทางด้านทุติยภูมิของขดลวด เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้สม่ำเสมอ



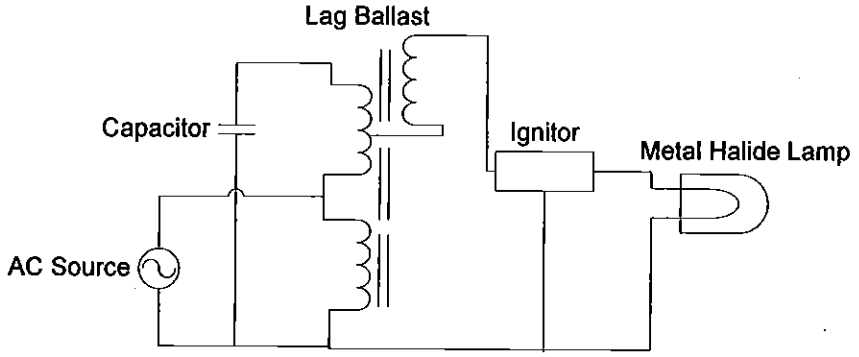
รูปที่ 2.8 วงจรการทำงานของหลอดเมทัลฮาไลด์กับบัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดัน

คุณสมบัติของบัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดัน (Regulator Ballast)

- สามารถใช้กับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันระหว่างสาย เปลี่ยนแปลงได้ ±10%
- สามารถทนกระแสขณะสตาร์ทได้ถึง 1.8 – 2.0 เท่า
- สามารถใช้กับแรงดันตามมาตรฐานได้กับหลอดเมทัลฮาไลด์ได้ทุกชนิด
- หลอดไฟจะต่อวงจรแยกออกจากสายส่ง
- ราคาแพง

บัลลาสต์แบบล้าหลัง (Lag Ballast)

เป็นบัลลาสต์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยมีแนวความคิดที่รวมเอา บัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดัน กับหม้อแปลงขดเดียว เข้าด้วยกัน เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟไม่ให้เปลี่ยนแปลงมากนัก



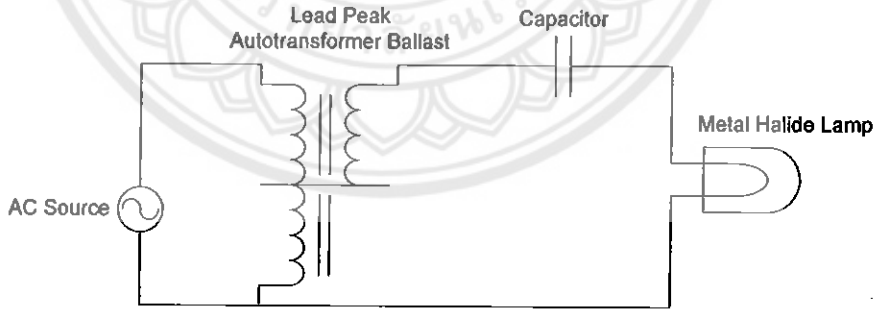
รูปที่ 2.9 วงจรการทำงานของหลอดเมทัลฮาไลด์กับบัลลาสต์แบบล้าหลัง

คุณสมบัติของบัลลาสต์แบบล้าหลัง (Lag Ballast)

- สามารถใช้กับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันระหว่างสายเปลี่ยนแปลงได้ ±5%
- สามารถทนกระแสไฟฟ้าขณะสตาร์ทได้สูง
- มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก
- หลอดไฟจะต่อวงจรแยกออกจากสายส่ง
- ราคาแพงกว่าบัลลาสต์แบบขดลวด

บัลลาสต์แบบนำค่าสูงโดยใช้หม้อแปลงขดเดียว (Lead Peak Autotransformer Ballast)

บัลลาสต์ชนิดนี้มีลักษณะคล้ายกับบัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงขดเดียว (Auto Regulator Ballast) แตกต่างกันตรงที่บัลลาสต์แบบนำค่าสูงจะเพิ่มจำนวนขดลวดมากขึ้น เพื่อต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ เพื่อให้มีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้ดีขึ้น



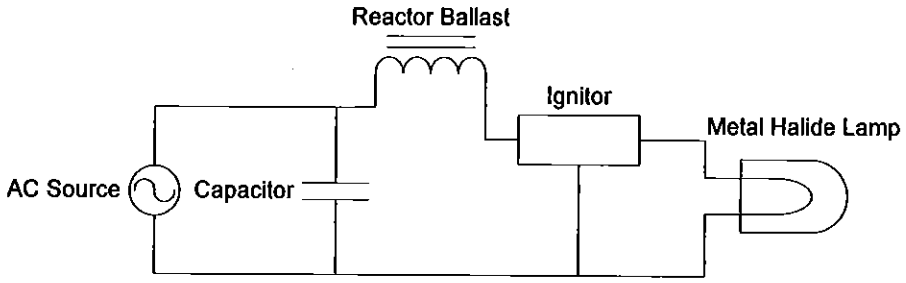
รูปที่ 2.10 วงจรการทำงานของหลอดเมทัลฮาไลด์กับบัลลาสต์แบบนำค่าสูงโดยใช้หม้อแปลงขดเดียว

คุณสมบัติของบัลลาสต์แบบนำค่าสูงโดยใช้หม้อแปลงขดเดียว (Lead Peak Autotransformer Ballast)

- สามารถใช้กับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันระหว่างสายเปลี่ยนแปลงได้ ±10%
- มีขนาดใหญ่กว่าบัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดัน (Regulator Ballast)
- สามารถทนกระแสไฟฟ้าขณะสตาร์ทได้ 1.6 – 1.8 เท่า
- ราคาสูงกว่าบัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดัน (Regulator Ballast)

บัลลาสต์แบบขดลวด (Reactor Ballast)

บัลลาสต์ชนิดนี้มีลักษณะเป็นคอยล์ของขดลวดพันรอบแกนเหล็ก เพื่อทำให้แรงดันไฟฟ้าสูงขณะเริ่มจุดหลอด ช่วยให้หลอดเมทัลฮาไลด์ทำงานได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.11 วงจรการทำงานของหลอดเมทัลฮาไลด์กับบัลลาสต์แบบขดลวด

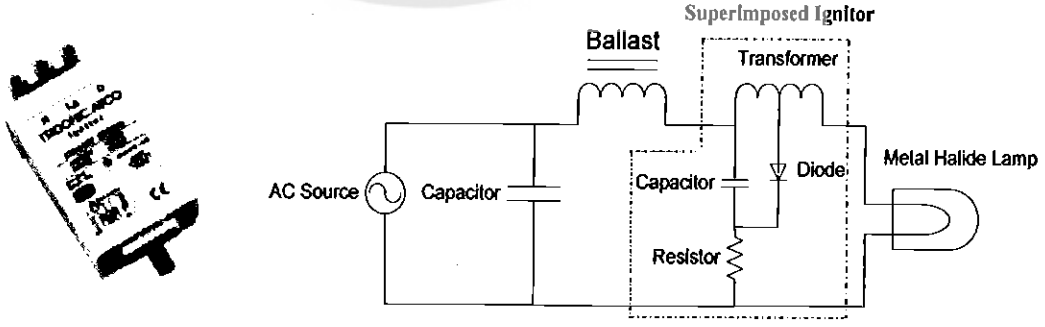
คุณสมบัติของบัลลาสต์แบบขดลวด (Reactor Ballast)

- สามารถใช้กับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันระหว่างสายเปลี่ยนแปลงได้ ±5%
- น้ำหนักเบา ขนาดเล็ก
- ตัวประกอบกำลังต่ำ แต่สามารถแก้ไขได้โดยต่อตัวเก็บประจุขนานกับวงจร
- ราคาถูก

2.2.3 ตัวจุดหลอด (Igniter)

หลอดเมทัลฮาไลด์ต้องการแรงดันสูงในการจุดหลอด แรงดันที่ต้องการมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 5 กิโลโวลต์ ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ที่จะสร้างแรงดันสูงเพื่อจุดหลอด อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้มีหน้าที่สร้างพัลส์แรงดันสูง (High Voltage Pulse) เสริมเข้ากับแรงดันไร้โหลดของหลอด เพื่อจุดหลอด เมื่อหลอดติดแล้วพัลส์ก็จะหยุด

โดยทั่วไป หลอดเมทัลฮาไลด์จะใช้ Superimposed Igniter เป็นตัวจุดหลอดที่จะสร้างพัลส์แรงสูง ภายในตัวของมันเอง แล้วส่งออกไปเพื่อจุดหลอด



ลักษณะภายนอก [6] โครงสร้างวงจร

รูปที่ 2.12 Superimposed Igniter

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลทั่วไปของหลอดเมทัลฮาไลด์ [3]

กำลังไฟฟ้า (W)	ฟลักซ์การส่องสว่าง (lm)	ขั้ว	ประสิทธิภาพความส่องสว่าง (lm/W)	อุณหภูมิสี (K)
Single-Ended				
70	5,100	G12	73	4,000
150	11,000	G12	73	4,000
Double-Ended				
70	5,500	Rx75	79	4,200
150	12,000	Rx75	80	4,200
250	20,000	FC2	80	4,200
400	35,000	FC2	88	5,600
1,000	95,000	Cable	95	5,900
2,000	200,000	Cable	103	5,800
Normal Tubular				
250	20,000	E40	80	5,300
400	32,000	E40	80	5,200
1,000	80,000	E40	80	6,000
2,000	180,000	E40	90	6,000

ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของหลอดเมทัลฮาไลด์ [3]

กำลังไฟฟ้า (W)	ประเภท	ขั้วหลอด และแรงดัน (V)	อุณหภูมิสี (K)	ดัชนีความถูกต้องสี (CRI)	ฟลักซ์ความส่องสว่าง (lm)	กำลังสูญเสียบัลลาสต์ (W)	อายุการใช้งาน (ชั่วโมง)
250	M	E40 (220V)	4,200	65	21,500	19	9,000
	M-T		4,200	65	20,000		
	MF		3,800	70	20,000		
	MF-R		3,800	70	13,700		
400	M	E40 (220V)	4,200	65	40,000	25	15,000
	M-T		4,200	65	38,000		
	MF		3,800	70	38,000		
	MF-R		3,800	70	22,000		
1,000	M	E40 (220V)	4,200	65	90,000	46	9,000
	M-T		4,200	65	85,000		
	MF		3,800	70	87,000		
2,000	M	E40 (380V)	4,200	65	185,000	52	6,000
	M-T		4,200	65	180,000		
	MF		3,800	70	180,000		

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของหลอดเมทัลฮาไลด์แบบใช้บัลลาสต์ของหลอดแสงจันทร์ [3]

กำลังไฟฟ้า (W)	ประเภท	ขั้วหลอด และ แรงดัน (V)	อุณหภูมิสี (K)	ดัชนีความถูกต้องสี (CRI)	ฟลักซ์ความส่องสว่าง (lm)	กำลังสูญเสียบัลลาสต์ (W)	อายุการใช้งาน (ชั่วโมง)
125	M	E27 (220V)	4,200	65	9,000	14	6,000
	MF		3,800	70	8,500		
250	M	E40 (220V)	4,200	65	21,500	18	9,000
	MX-T		6,500	90	18,200		
	MF		3,800	70	20,000		
	MFX		6,500	90	14,500		
400	M	E40 (220V)	4,200	65	40,000	22	9,000
	MX-T		6,500	90	32,000		
	MF		3,800	70	38,000		
	MFX		6,500	90	24,500		
1,000	M	E40 (220V)	4,200	65	90,000	45	9,000
	MF		3,800	65	87,000		

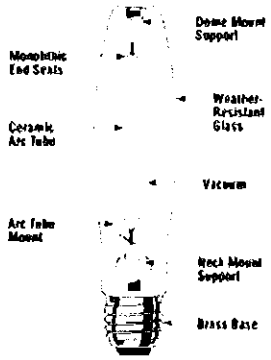
หมายเหตุ

- M : หลอดแก้วใส ทรงบีที หรือทรงอีลิป
- MF : หลอดแก้วเคลือบสาร ทรงบีที หรือทรงอีลิป
- MX-T : หลอดแก้วใส ปรับปรุงพิเศษ ทรงหลอดแก้วยาว
- MFX : หลอดแก้วเคลือบสาร ปรับปรุงสีพิเศษ ทรงบีที หรือทรงอีลิป
- M-T : หลอดแก้วใส ทรงหลอดยาว
- MF-R : หลอดแก้วเคลือบสาร ทรงสปอร์ตไลท์
- MF : หลอดแก้วเคลือบสาร ทรงบีที หรือทรงอีลิป

2.3 หลอดโซเดียมความดันสูง (High Pressure Sodium Lamp)

หลอดโซเดียมความดันสูง เป็นหลอดที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ในบรรดาหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงด้วยกัน มีอายุการใช้งานยาวมาก ให้แสงสีทอง-เหลือง ปัจจุบันหลอดโซเดียมความดันสูงสามารถมีประสิทธิภาพถึง 157 ลูเมนต่อวัตต์ แต่ให้ความถูกต้องของสีไม่ดี จึงเหมาะกับที่ที่ต้องการเพียงแสงสว่าง แต่ไม่คำนึงถึงความถูกต้องสี นิยมใช้ส่องสว่างเป็นไฟในโรงงาน ไฟถนน เป็นต้น หลอดโซเดียมความดันสูงจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าหลอดเมทัลฮาไลด์และหลอดฟลูออเรสเซนต์ถึง 50% และมีประสิทธิภาพสูงกว่าหลอดแสงจันทร์ถึงเท่าตัว และยังสูงกว่าหลอดไส้ 6 เท่า อายุการใช้งาน 18,000 – 24,000 ชั่วโมง

ลักษณะภายนอก [7]



โครงสร้าง [8]

รูปที่ 2.13 หลอดโซเดียมความดันสูง

โครงสร้างและการทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูงจะแตกต่างจากหลอด HID แบบอื่นๆ กล่าวคือ หลอดของมันจะทำด้วยเซรามิก (Polycrystalline Translucent Alumina) ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่หลอดทำงาน ความร้อนและความดันจากการคายประจุของโซเดียมจะสูงมาก นอกจากนี้ภายในหลอดจะประกอบด้วยก๊าซซีนอน ปรอท และโซเดียมปนอยู่ แต่จะไม่มีสตาร์ทติ้งอิเล็กโทรด และ สตาร์ทติ้งรีซิสเตอร์อยู่เลย

2.3.1 ลักษณะการทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูง

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรของหลอดโซเดียมความดันสูงแล้ว ตัวจุดหลอดจะเป็นตัวสร้างพัลส์ที่มีความถี่สูง เพื่อที่จะทำให้บัลลาสต์สร้างแรงดันไฟฟ้าสูง เพื่อไปใช้ในการจุดหลอด ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมานี้มีค่าประมาณ 2,500 – 3,000 โวลต์ แต่จะเกิดขึ้นในระยะเวลาสั้นๆ และรวดเร็วมากแล้วก็จะตกลง ขณะเดียวกันระหว่างปลายทั้งสองข้างของอิเล็กโทรด ก๊าซซีนอนก็จะเริ่มแตกตัวทำให้ความร้อนและความดันภายในหลอดสูงขึ้นเรื่อยๆ ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหลอดอาร์คนี้จะทำให้ก๊าซโซเดียมและปรอทเกิดการแตกตัวตาม ซึ่งจะทำให้แสงเริ่มสว่างขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสว่างจ้าในที่สุด แต่ในขณะที่เริ่มจุดหลอด กระแสจะไหลน้อยมาก เพราะค่าความต้านทานภายในหลอดยังมีค่าสูงอยู่ แต่พอก๊าซเฉื่อยเริ่มแตกตัว จะทำให้ความร้อนภายในหลอดสูงขึ้นเรื่อยๆ ความต้านทานภายในหลอดอาร์คก็จะลดลง และทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้มากขึ้น เป็นเหตุให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมหลอดลดลง และกลับเข้าสู่สภาพปกติที่ออกแบบไว้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหลอดก็จะคงที่ ในขณะที่ก๊าซเฉื่อยเริ่มแตกตัว ถ้าสังเกตที่หลอดก็จะเห็นเป็นสีแดง เมื่อความร้อนมีปริมาณเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ก๊าซโซเดียมที่เกิดการแตกตัวก็จะให้แสงสีเหลืองออกมา ซึ่งคุณสมบัติของไอปรอทก็คือ เมื่อแตกตัวจะให้แสงสีคล้ายกับสีในตอนกลางวัน จึงเป็นเหตุให้หลอดโซเดียมความดันสูงมีสีค่อนข้างเหลืองจ้า

สีของหลอดโซเดียมความดันสูงขณะที่เริ่มทำงานจะเห็นได้ว่า ระยะแรกหลอดจะให้สีออกมาเป็นสีน้ำเงินขาว เนื่องจากการแตกตัวของก๊าซซีนอนและปรอท อีกเพียงชั่วครู่หนึ่ง สีของแสงจะเริ่มเปลี่ยนเป็นแสงสีเหลือง คล้ายๆ กับสีของหลอดโซเดียมความดันต่ำ แล้วจะค่อยๆ สว่างจ้าขึ้นเรื่อยๆ

จนกระทั่งหลอดสว่างเต็มที่ ขณะนี้สีของแสงจะดูคล้ายกับสีของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดวอร์มไวท์ แต่สีดูค่อนข้างขุ่นกว่า ระยะเวลาช่วงนี้จะกินเวลาประมาณ 3-4 นาที

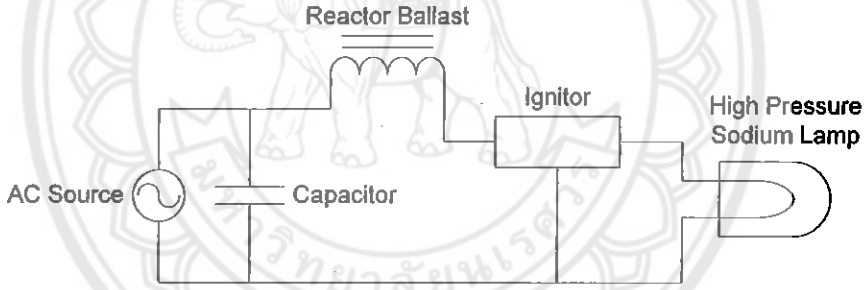
2.3.2 บัลลาสต์ที่ใช้กับหลอดโซเดียมความดันสูง

ในการทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูง นอกจากจะมีตัวจุดหลอดประกอบอยู่ในวงจรเพื่อช่วยสร้างพัลส์แล้ว จะต้องมีบัลลาสต์ประกอบอยู่ในวงจรด้วย จึงทำให้วงจรของหลอดไฟทำงานได้ ซึ่งบัลลาสต์ที่นิยมใช้กันทั่วไปสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง มีดังนี้

- บัลลาสต์แบบขดลวด (Reactor Ballast)
- บัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (Regulator Ballast)
  - บัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดันแบบใช้หม้อแปลงขดเดียว (Auto Regulator Ballast)
  - บัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยแม่เหล็ก

บัลลาสต์แบบขดลวด (Reactor Ballast)

บัลลาสต์ชนิดนี้มีลักษณะธรรมดา ที่มีใช้อยู่ปัจจุบัน คือ เอาขดลวดพันรอบแกนเหล็กที่เป็นแผ่นบางๆ หลายๆ แผ่นเรียงซ้อนกันอยู่



รูปที่ 2.14 วงจรการทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูงกับบัลลาสต์แบบขดลวด

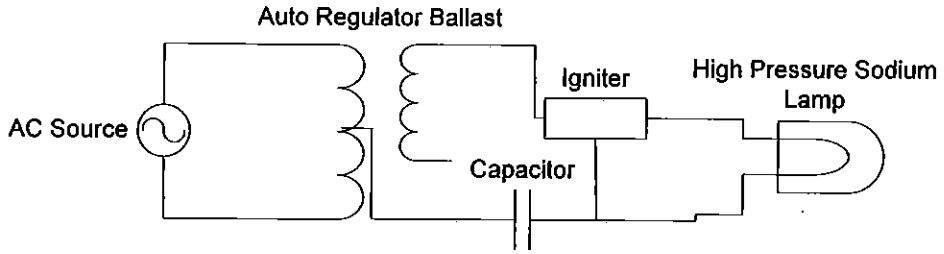
คุณสมบัติของบัลลาสต์แบบขดลวด (Reactor Ballast)

- สามารถใช้ได้กับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันระหว่างสายเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±5%
- ค่าตัวประกอบกำลังต่ำ แต่แก้ไขได้ด้วยการต่อตัวเก็บประจุขนานกับวงจร
- ราคาถูก น้ำหนักเบา

บัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (Regulator Ballast)

- บัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแบบใช้หม้อแปลงขดเดียว (Auto Regulator Ballast)

เป็นบัลลาสต์ที่สร้างขึ้นมาโดยอาศัยหลักการของหม้อแปลงขดเดียว เพื่อให้บัลลาสต์รักษาระดับแรงดันตกคร่อมหลอดให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด



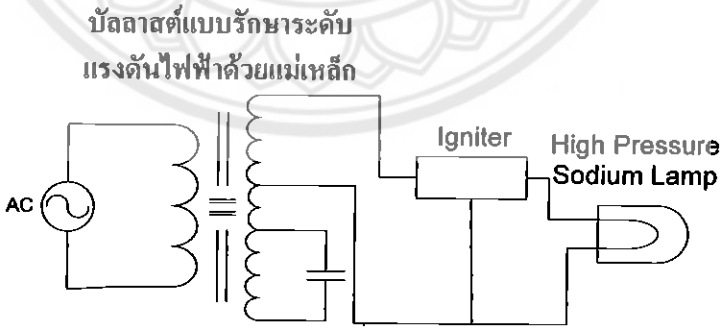
รูปที่ 2.15 วงจรการทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูงกับบัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแบบใช้หม้อแปลงขดเดียว

คุณสมบัติของบัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแบบใช้หม้อแปลงขดเดียว

- สามารถใช้ได้กับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันระหว่างสายเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±10%
- มีความเสี่ยงและสูญเสียน้อยกว่า บัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าธรรมดา แต่มากกว่าบัลลาสต์แบบขดลวด
- หลอดไฟจะต้องแยกออกจากระบบสายส่ง
- มีขนาดเล็กและเบากว่า บัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าธรรมดา แต่ใหญ่กว่าบัลลาสต์แบบขดลวด

บัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยแม่เหล็ก

บัลลาสต์ชนิดนี้จะประกอบด้วยขดลวด 3 ชุด แยกออกจากกัน คือ ขดลวดปฐมภูมิ 1 ชุด และขดลวดทุติยภูมิอีก 2 ชุด โดยที่ขดลวดทุติยภูมิขดแรกจะต่อเข้ากับตัวเก็บประจุ เพื่อทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ส่วนขดลวดชุดที่สอง จะต่อเข้ากับหลอดและตัวจุดหลอด แล้วขดลวดทางด้านทุติภูมินี้ยังทำงานอยู่ในช่วงแกนเหล็กที่มีสภาพแม่เหล็กอิ่มตัวอีกด้วย



รูปที่ 2.16 วงจรการทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูงกับบัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยแม่เหล็ก

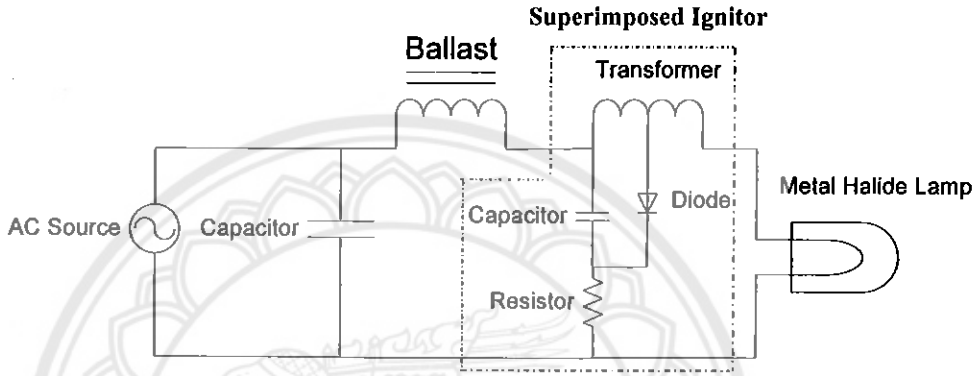
คุณสมบัติของบัลลาสต์แบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยแม่เหล็ก

- สามารถใช้ได้กับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันระหว่างสายเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±10%
- มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก
- ราคาแพง

2.3.3 ตัวจุดหลอด (Igniter)

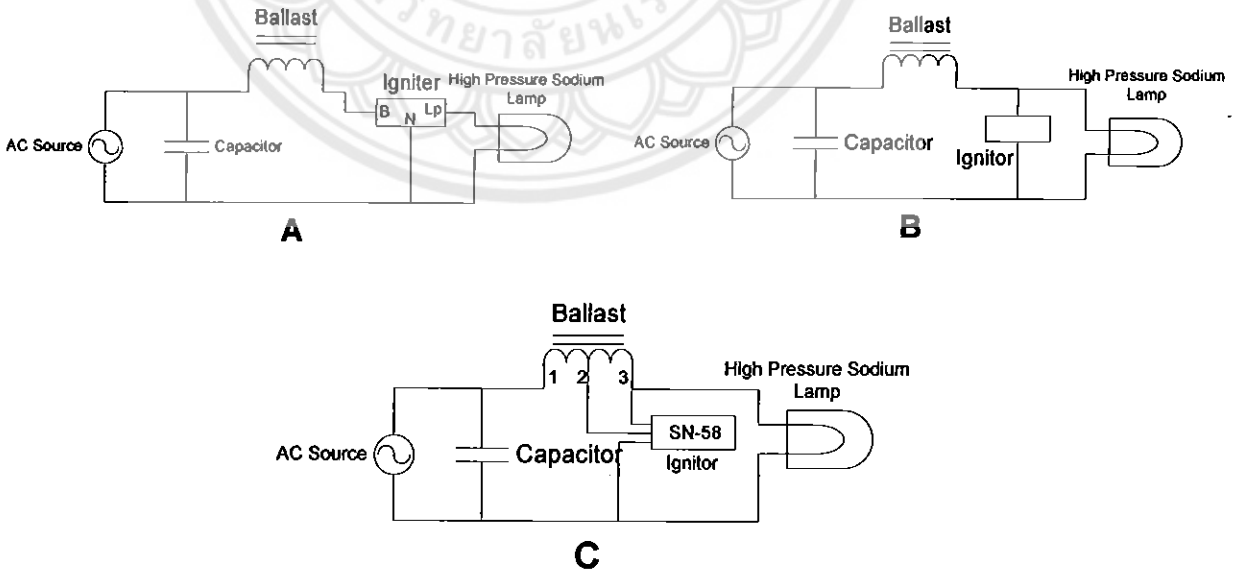
หลอดโซเดียมความดันสูงต้องการแรงดันสูงในการจุดหลอด แรงดันที่ต้องการมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 5 กิโลโวลต์ ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ที่จะสร้างแรงดันสูงเพื่อจุดหลอด อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้มีหน้าที่สร้างพัลส์แรงดันสูง (High Voltage Pulse) เสริมเข้ากับแรงดันไร้โหลดของหลอด เพื่อจุดหลอด เมื่อหลอดติดแล้วพัลส์ก็จะหยุด ซึ่งตัวจุดหลอดที่นิยมใช้กับหลอดโซเดียมความดันสูงมีอยู่ 2 ชนิด คือ

- **Superimposed Igniter** ตัวจุดหลอดประเภทนี้จะสร้างพัลส์แรงดันสูงภายในตัวของมันเอง แล้วส่งออกไปเพื่อจุดหลอด มีวงจรการทำงาน ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.17 ลักษณะวงจรของ Superimposed Igniter

- **Pulse Igniter** จะใช้ขดลวดบัลลาสต์ทำหน้าที่คล้ายหม้อแปลงขาขึ้น เพื่อสร้างพัลส์ ในการจุดหลอดดังนั้นขดลวดของบัลลาสต์จะต้องทนพัลส์แรงดันสูงได้ ระบบนี้ตัวจุดหลอดสามารถติดตั้งแยกออกมาจากวงจรได้



รูปที่ 2.18 ลักษณะวงจรของ Pulse Igniter ทั้งสามแบบ

ตารางที่ 2.7 ข้อมูลทั่วไปของหลอดโซเดียมความดันสูง [3]

กำลังไฟฟ้า (W)	ฟลักซ์การส่องสว่าง (lm)	ขั้ว	ประสิทธิภาพความส่องสว่าง (lm/W)	อุณหภูมิสี (K)
Standard				
70	3,500	E27	70	2,000
50	5,600	E27	80	2,000
150	14,000	E40	93	2,000
250	25,000	E40	100	2,000
400	47,000	E40	118	2,000
1,000	128,000	E40	128	2,000
Super High Efficacy				
50	4,400	E27	81	2,000
70	6,500	E27	93	2,000
100	10,000	E40	100	2,000
150	17,500	E40	113	2,000
250	33,000	E40	127	2,000
400	55,500	E40	135	2,000
HPM Ballast				
110	8,000	E40	73	2,000
220	20,000	E40	91	1,950
350	34,500	E40	99	1,950
Deluxe				
150	12,000	E40	80	2,200
250	22,000	E40	88	2,200
400	39,000	E40	101	2,200

ตารางที่ 2.8 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของหลอดโซเดียมความดันสูง [3]

กำลังไฟฟ้า (W)	ประเภท	ขั้วหลอด และ แรงดัน (V)	อุณหภูมิสี (K)	ดัชนีความถูกต้องสี (CRI)	ฟลั๊กซ์ความส่องสว่าง(lm)	กำลังสูญเสียบัลลาสต์ (W)	อายุการใช้งาน (ชั่วโมง)
250	SON	E40 (220V)	2,100	25	25,800	24	24,000
	SON/DX		2,500	85	12,800		9,000
	SON-T		2,100	25	27,000		24,000
	SON-R		2,100	25	19,800		24,000
	SON/DX-R		2,500	85	9,500		9,000
	SON-G		2,100	25	25,800		24,000
400	SON	E40 (220V)	2,100	25	47,000	31	24,000
	SON/DX		2,500	85	23,000		9,000
	SON-T		2,100	25	47,000		24,000
	SON-R		2,100	25	33,600		24,000
	SON/DX-R		2,500	85	18,000		9,000
1,000	SON	E40 (220V)	2,100	25	120,000	55	24,000
	SON-T		2,100	25	125,000		

หมายเหตุ

- **SON:** หลอดแก้วเคลือบสาร ทรงบีที หรือทรงอีลิป
- **SON-G:** หลอดแก้วเคลือบสาร ทรงกลม
- **SON/DX:** หลอดแก้วใส ปรับปรุงพิเศษ ทรงบีที หรือทรงอีลิป
- **SON-T:** หลอดแก้วใส ทรงหลอดยาว
- **SON-R:** หลอดแก้วเคลือบสาร ทรงสปอร์ตไลท์
- **SON/DX-R:** หลอดแก้วเคลือบสาร ปรับปรุงพิเศษ ทรงสปอร์ตไลท์

ตารางที่ 2.9 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของหลอดโซเดียมความดันสูงแบบพิเศษชนิดใช้กับบัลลาสต์ของหลอดแสงจันทร์ [3]

กำลังไฟฟ้า (W)	ประเภท	ขั้วหลอด และแรงดัน (V)	อุณหภูมิสี (K)	ดัชนีความถูกต้องสี (CRI)	ฟลักซ์ความส่องสว่าง (lm)	กำลังสูญเสียบัลลาสต์(W)	อายุการใช้งาน (ชั่วโมง)
75	SONX	E27 (220V)	2,100	25	6,200	10	20,000
110	SONX	E40 (220V)	2,100	25	11,000	14	24,000
	SONX-R		2,100	25	7,400		
220	SONX	E40 (220V)	2,100	25	26,500	18	24,000
	SONX/DX		2,150	60	19,000		
	SONX-T		2,100	25	28,000		
	SONX-R		2,100	25	20,000		
	SONX/DX-R		2,150	60	14,500		
360	SONX	E40 (220V)	2,100	25	47,500	22	24,000
	SONX/DX		2,150	60	36,000		
	SONX-T		2,100	25	50,000		
	SONX-R		2,100	25	36,000		
	SONX/DX-R		2,150	60	27,000		
940	SONX	E40 (220V)	2,100	25	141,000	45	24,000
	SONX-T		2,100	25	148,000		

หมายเหตุ

- **SONX:** หลอดแก้วเคลือบสาร ทรงบีที หรือทรงอีลิป
- **SONX-T:** หลอดแก้วใส ทรงหลอดยาว
- **SONX/DX:** หลอดแก้วใส ปรับปรุงพิเศษ ทรงบีที หรือทรงอีลิป
- **SONX-G:** หลอดแก้วเคลือบสาร ทรงกลม
- **SONX-R:** หลอดแก้วเคลือบสาร ทรงสปอร์ตไลท์
- **SONX/DX-R:** หลอดแก้วเคลือบสาร ปรับปรุงพิเศษ ทรงสปอร์ตไลท์

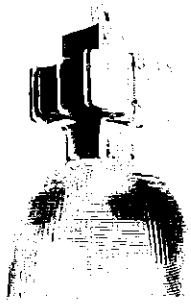
2.4 โคมไฟที่ใช้กับหลอดปล่อยประจุความเข้มสูง

โคมไฟประเภทนี้โดยส่วนมากจะมีตัวสะท้อนแสงเป็นแบบอลูมิเนียม (Aluminum Reflector) หรือ ตัวหักเหแสงพลาสติก (Plastic Reflector) อาจจะมีเลนส์ ปิดหน้าหลอดก็ได้ ทั้งหมดขึ้นอยู่กับการใช้งานในแต่ละอุตสาหกรรม ความสูง การกระจายแสงของโคมไฟที่ต้องการ ซึ่งการกระจายแสงของโคมไฟมี 2 ลักษณะดังนี้

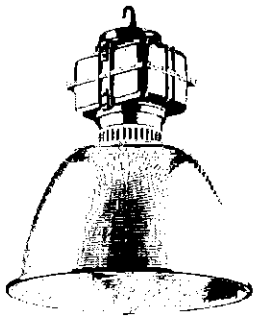
2.4.1 โคมไฮเบย์ (High bay)

โคมประเภทนี้จะติดตั้งในที่มีความสูงจากพื้นตั้งแต่ 7 เมตรขึ้นไป ส่วนมากจะเป็นหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงและมีแผ่นสะท้อนแสงเป็นชุดประกอบภายในโคม

i7194973
ป
๐๑๒๕๘
๒๕๖๑
สำนักหอสมุด
10 มิ.ย. 2560



ชนิดไม่มีฝาครอบ [9]



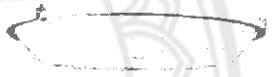
ชนิดมีฝาครอบ [10]

รูปที่ 2.21 โคมไฮเบย์

2.4.2 โคมโลเบย์ (Low Bay)

โคมประเภทนี้เหมาะสำหรับการติดตั้งที่ความสูงระดับ 4-7 เมตร และให้ลำแสงที่กว้าง

ชาร์จเจอร์โลเบย์ [11]



ฟีกเจอร์โลเบย์ [12]

รูปที่ 2.22 โคมโลเบย์

นอกจากนี้โคมดังกล่าวจะมีรูปแบบแสงต่างๆ เช่น วงกลม หรือ สี่เหลี่ยม เป็นต้น ซึ่งลักษณะรูปแบบของโคมจะเป็นดังนี้

สว่างไม่สม่ำเสมอ สว่างสม่ำเสมอ สว่างสม่ำเสมอมาก

รูปที่ 2.23 รูปแบบแสงที่ออกมาจากโคม [13]

โคมที่ให้แสงแบบกระจายแสงเป็นวงกลมนั้น เหมาะสำหรับใช้ในพื้นที่ที่ไม่กว้างมาก หรือพื้นที่ที่ไม่พิถีพิถันกับความสม่ำเสมอของแสง ส่วนโคมที่ให้แสงกระจายเป็นสี่เหลี่ยม เหมาะสำหรับใช้ในพื้นที่ที่กว้างและต้องการความสม่ำเสมอของแสงโดยทั่วพื้นที่ ซึ่งจะทำให้สามารถประหยัดโคมไฟและจำนวนหลอดได้ดีกว่า การเลือกโคมไฟแบบกระจายแสง การเลือกใช้กำลังไฟฟ้าของหลอดนั้นจะต้องคำนึงถึง ความสูงในการติดตั้งด้วย

บทที่ 3
ขั้นตอนการศึกษาและการดำเนินงาน

ในการศึกษาผลกระทบของการใช้หลอดปล่อยประจุความเข้มสูง เพื่อศึกษาถึง ช่วงเวลาอุ่นหลอดจนถึงช่วงเวลาคงที่ของ แรงดัน กระแส และความส่องสว่างของหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงแต่ละชนิด และทดสอบการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ เทียบกับเวลา

1. เตรียมอุปกรณ์ พร้อมกับต่อวงจร
2. เตรียมเครื่องมือวัด วางแผนจุดที่วัด
3. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันเข้ากับวงจร
4. วัดผลการทดลอง บันทึกผล

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้

- หลอดแสงจันทร์ ขนาด 250 วัตต์ (HPL-N250W)
- หลอดเมทัลฮาไลด์ ขนาด 250 วัตต์ (ARC250/T/H/960/E40)
- หลอดโซเดียมความดันสูง ขนาด 150 วัตต์ (SON-T 150W)
- บัลลาสต์สำหรับหลอดแสงจันทร์ (GATA220V/400W/3A)
- บัลลาสต์สำหรับหลอดเมทัลฮาไลด์หรือหลอดโซเดียมความดันสูง (GATA220V/250W/3A)
- ตัวจุดหลอด (GATA 220-240V / I_B max = 4.6A)
- ตัวเก็บประจุสำหรับหลอดปล่อยประจุความเข้มสูง (250V/22μF)
- มัลติมิเตอร์
- เทอร์โมมิเตอร์
- เครื่องวัดแสง
- สายไฟ
- เชิงโคม

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

- ต่อวงจรของหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงทั้ง 3 ชนิด
- ต่อแหล่งจ่ายแรงดันเข้ากับวงจรหลอดไฟแต่ละชนิด วัดกระแสและแรงดันเทียบกับเวลา บันทึกผล
- นำหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงทั้งสามชนิดมาจุดหลอด ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ได้แก่ 15°C, 20°C, 25°C, 30°C และ 35°C แล้ววัดค่ากระแสและแรงดันเทียบกับเวลา บันทึกผล

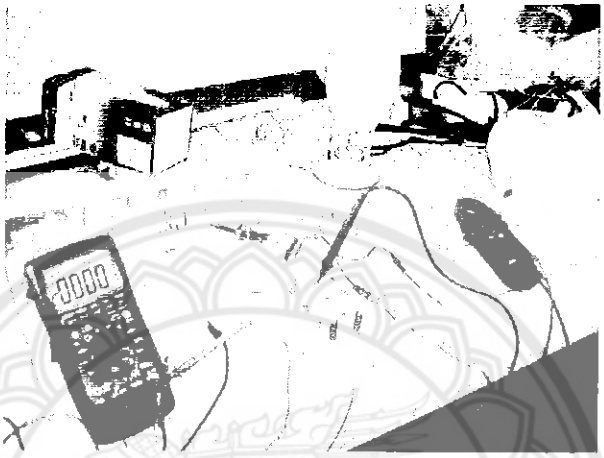
- ต่อแหล่งจ่ายแรงดันเข้ากับวงจรหลอดไฟแต่ละชนิด วัดค่าความส่องสว่างเทียบกับเวลาบันทึกผล
- นำแผนภูมิที่ได้จากผลการทดลองมาวิเคราะห์ผลกระทบของการใช้งาน

บทที่ 4

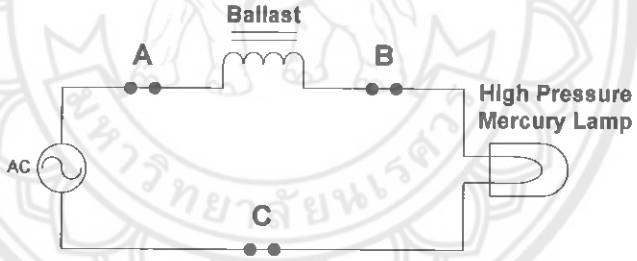
ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองวัดแรงดันและกระแส

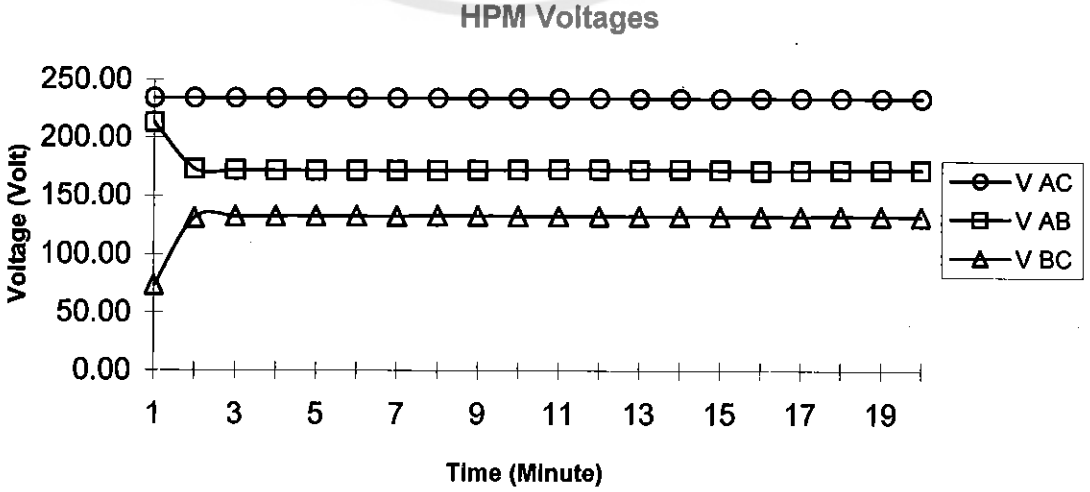
4.1.1 หลอดแสงจันทร์



รูปที่ 4.1 วงจรหลอดแสงจันทร์ที่ใช้ในการทดลอง

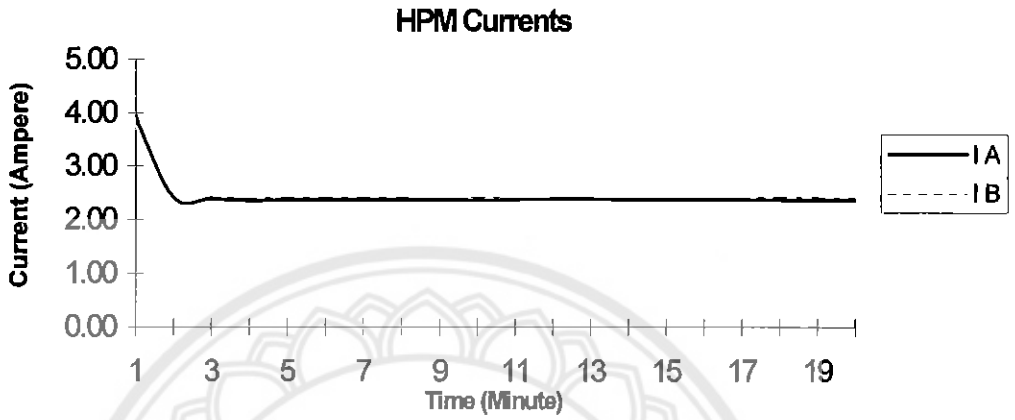


รูปที่ 4.2 วงจรหลอดแสงจันทร์



รูปที่ 4.3 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดแสงจันทร์

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าแรงดันที่จ่ายให้กับวงจร (V_{AC}) คงที่อยู่ที่ประมาณ 234 โวลต์ตลอดเวลา ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{AB}) จะมีค่าสูงขณะเริ่มจุดหลอด แล้วลดลงเรื่อยๆ จนถึงประมาณ 172 โวลต์ ที่เวลา 3 นาที เป็นต้นไป และแรงดันที่ตกคร่อมหลอด (V_{BC}) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงเวลาประมาณ 3 นาทีแล้วจึงคงที่ที่ประมาณ 132.5 โวลต์

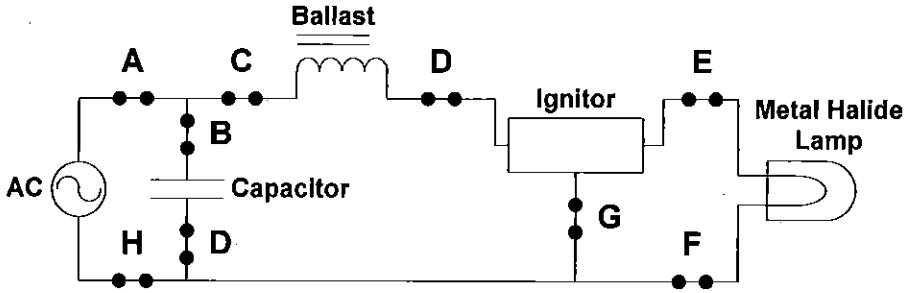


รูปที่ 4.4 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์

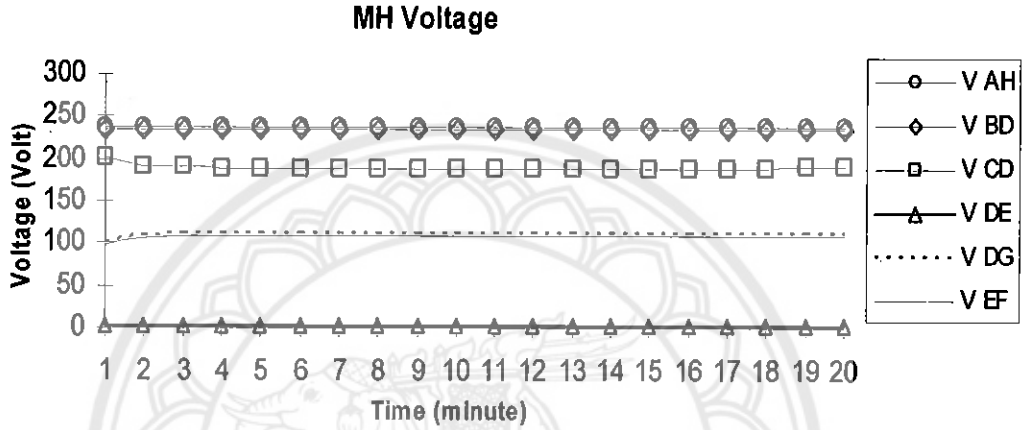
จากรูปที่ที่ 4.4 จะเห็นว่า กระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_A) และ กระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_B) จะมีค่าสูงขณะเริ่มจุดหลอด แล้วค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลาประมาณ 3 นาที กระแสถึงเริ่มคงที่อยู่ที่ประมาณ 2.4 แอมแปร์

4.1.2 หลอดเมทัลฮาไลด์

รูปที่ 4.5 วงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ใช้ในการทดลอง

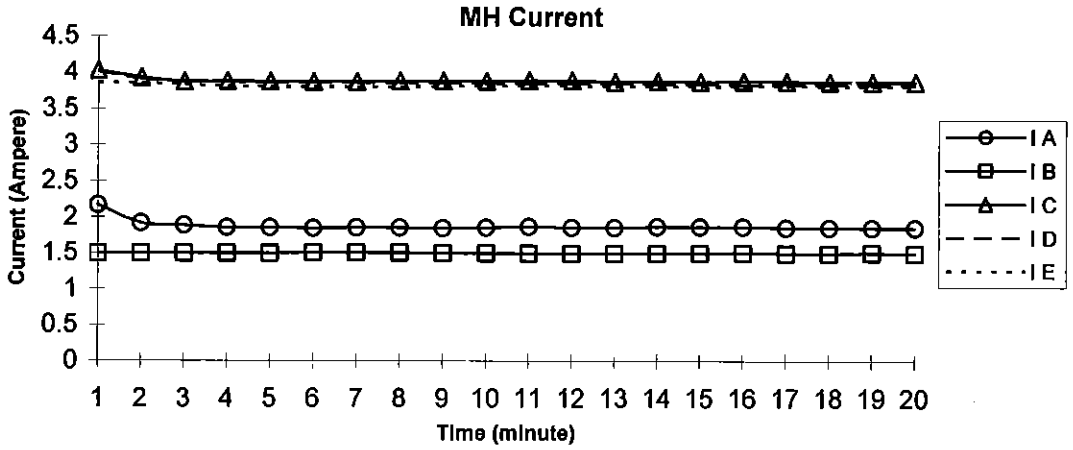


รูปที่ 4.6 วงจรหลอดเมทัลฮาไลด์



รูปที่ 4.7 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าแรงดันที่จ่ายให้กับวงจร (V_{AH}) กับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{BD}) มีค่าใกล้เคียงกันและคงที่ตลอด ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{CD}) จะมีค่าสูงขณะเริ่มจุดหลอด แล้วลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลาประมาณ 4 นาที กระแสถึงเริ่มคงที่ อยู่ที่ประมาณ 189 โวลต์ และแรงดันที่ตกคร่อมตัวจุดหลอด (V_{DE}) มีค่าคงที่และน้อยมากประมาณ 3 โวลต์ แรงดันที่ตกคร่อมหลอด (V_{EF}) มีค่าเริ่มต้นที่ 3.86 แอมแปร์ที่นาทีแรก และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงเวลาประมาณ 5 นาที จึงจะคงที่ ประมาณ 190 โวลต์ ส่วน V_{DG} เป็นแรงดันที่ตกคร่อมตัวจุดหลอดและหลอดเมทัลฮาไลด์

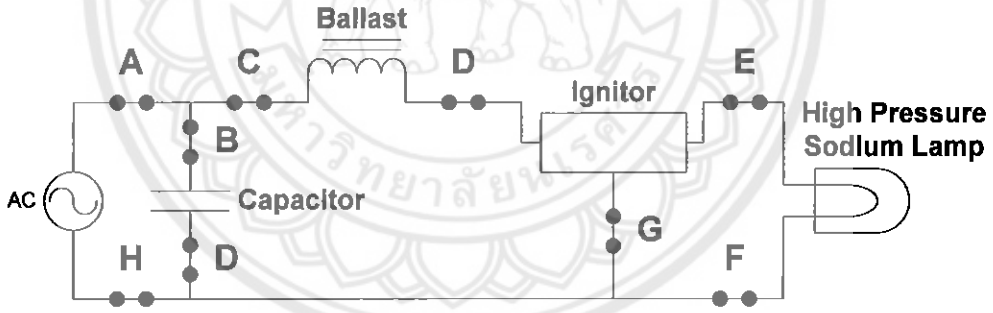


รูปที่ 4.8 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์

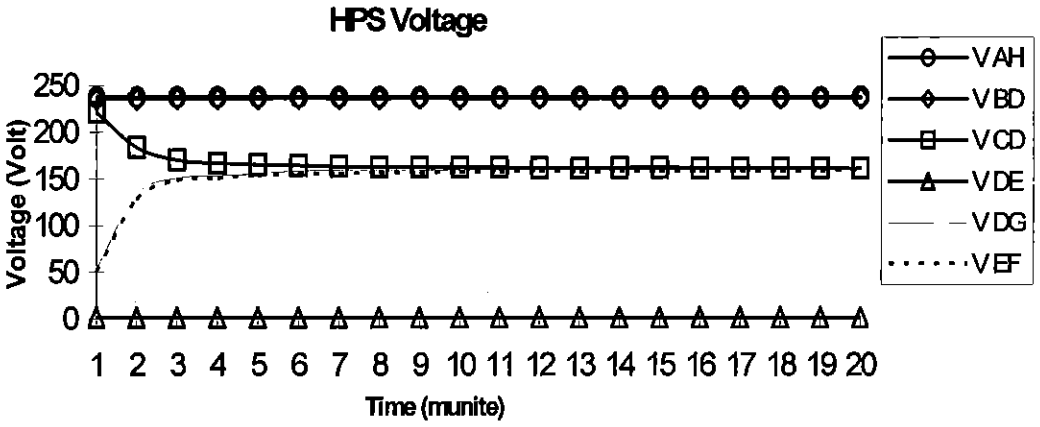
จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่า กระแสที่ไหลเข้าวงจร (I_A) จะมีค่า 4.1 แอมแปร์ที่นาทีแรก แล้วค่อยๆ ลดลงและคงที่ประมาณ 3.8 แอมแปร์ กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ (I_B) จะคงที่อยู่ที่ประมาณ 1.5 แอมแปร์ ส่วนกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_C) และกระแสที่ไหลเข้าตัวจุดหลอด (I_D) จะมีค่า 4.0 แอมแปร์ที่นาทีแรก แล้วค่อยๆ ลดลงจนคงที่ที่ประมาณ 3.8 แอมแปร์ กระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_E) จะมีค่า 3.8 แอมแปร์ที่นาทีเริ่มต้น ลดลงเรื่อยๆ จนถึงนาทีที่ 4 จะคงที่อยู่ที่ 3.81 แอมแปร์ ตลอด

4.1.3 หลอดโซเดียมความดันสูง

รูปที่ 4.9 วงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ใช้ทดลอง

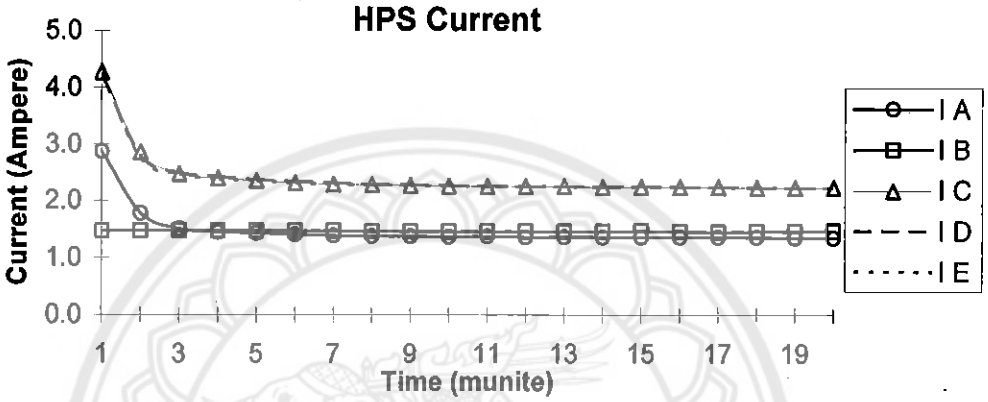


รูปที่ 4.10 วงจรหลอดโซเดียมความดันสูง



รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูง

จากรูปที่ที่ 4.11 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (V_{AH}) กับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{BD}) จะมีค่าใกล้เคียงกันและคงตัวตลอดที่ 237 โวลต์ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{CD}) จะมีค่าสูงในช่วงเริ่มจุดหลอดและลดต่ำลงมาเรื่อยๆ จนถึง 166 โวลต์ในนาทีที่ 4 จากนั้นก็ค่อยๆลดลงจนคงที่อยู่ที่ประมาณ 161โวลต์ แรงดันที่ตกคร่อมตัวจุดหลอด (V_{DE}) จะมีค่าคงที่และน้อยมากอยู่ที่ 1.2 โวลต์ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{EF}) จะมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 150 โวลต์ที่เวลาประมาณ 3.5 นาที แล้วค่อยๆ คงที่เรื่อยๆ แล้วคงตัวที่ประมาณ 6 นาที ที่ 155 โวลต์ ส่วนแรงดัน V_{DG} เป็นแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างตัวจุดหลอดกับหลอดไฟ



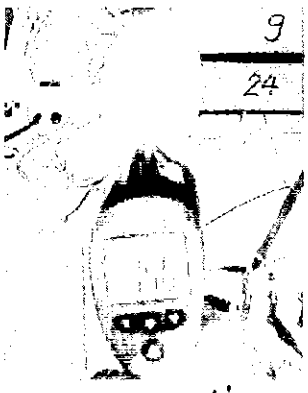
รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูง

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่า กระแสที่ไหลเข้าวงจร (I_A) มีค่าประมาณ 3 แอมแปร์ในนาทีแรก แล้วลดลงถึง 1.5 แอมแปร์ที่เวลา 3 นาที หลังจากนั้นก็เริ่มคงที่ที่ประมาณ 1.4 แอมแปร์ กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ (I_B) มีค่าคงที่ตลอดที่ 1.5 แอมแปร์ ส่วนกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_C) กระแสที่ไหลเข้าตัวจุดหลอด (I_D) และกระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_E) มีค่าสูงตอนจุดหลอด โดยในนาทีแรกสูงถึง 4.25 แอมแปร์ แล้วลดลงจนถึงเวลาประมาณ 2.5 นาทีหลังจากนั้นก็ค่อยๆ คงที่อยู่ที่ 2.25 แอมแปร์

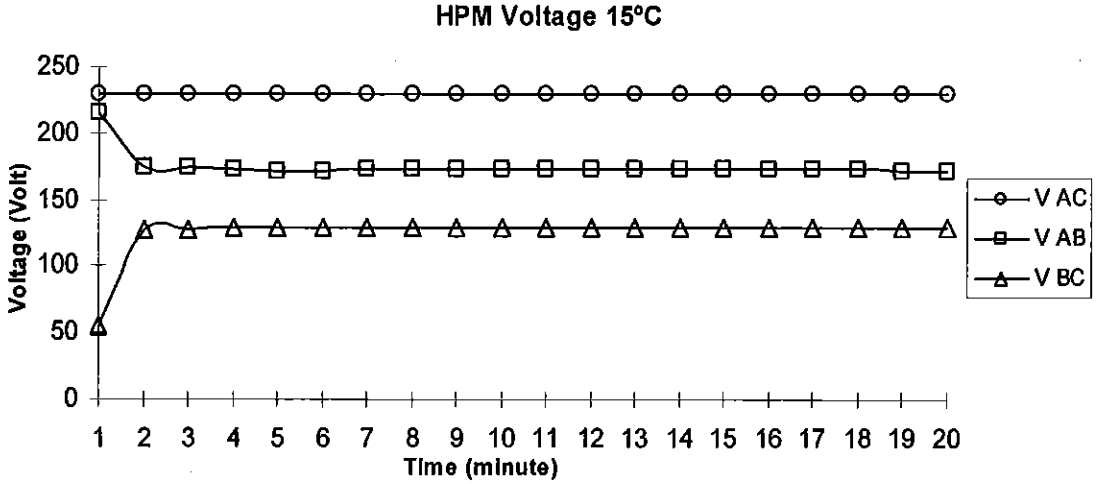
4.2 ผลการทดลองวัดแรงดันและกระแสที่อุณหภูมิต่างๆ

4.2.1 หลอดแสงจันทร์

- หลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 15°C

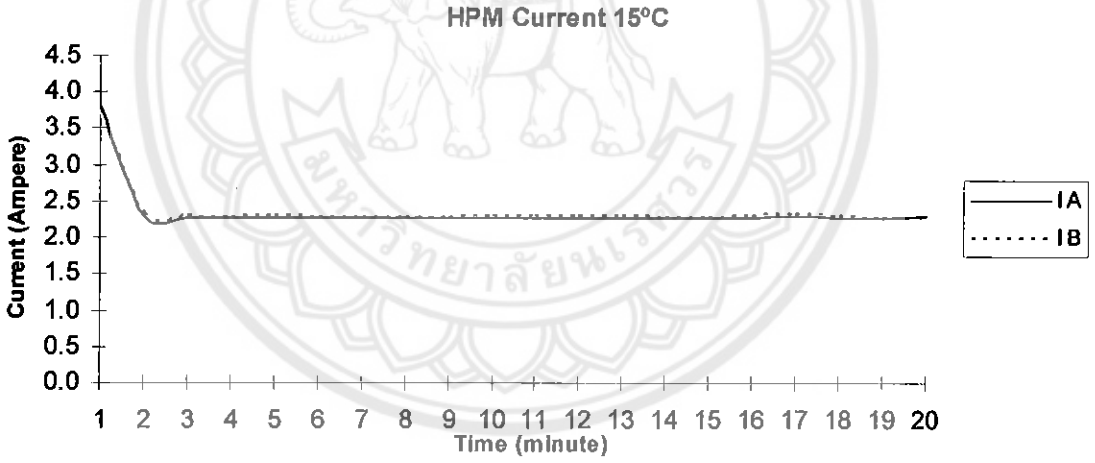


รูปที่ 4.13 หลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 15°C



รูปที่ 4.14 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 15°C

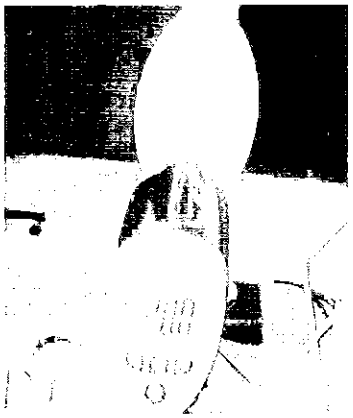
จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (V_{AC}) มีค่าคงที่ที่ประมาณ 230 โวลต์ ตลอด ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{AB}) จะมีค่าสูงถึง 215 โวลต์ แล้วลดลงมาเรื่อยๆ ที่เวลา 3 นาทีถึงเริ่มคงที่ที่ 172 โวลต์ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{BC}) ช่วงเริ่มจุดหลอดจะมีค่าต่ำ จากนั้นก็เพิ่มสูงขึ้นถึง 128 โวลต์ ที่เวลา 3 นาที แล้วคงที่



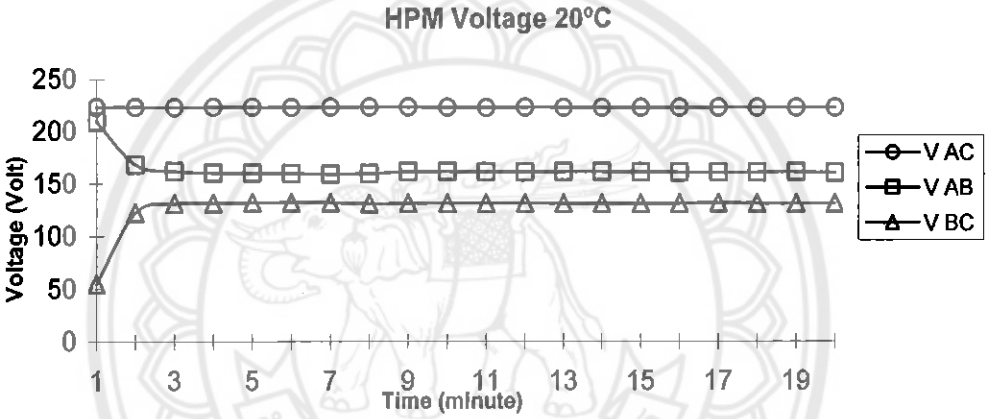
รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 15°C

จากรูปที่ 4.15 กระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_A) และกระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_B) มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ ช่วงเวลาจุดหลอดจะมีกระแสที่สูงถึง 3.8 แอมแปร์ ที่เวลา 1 นาที จากนั้นก็ลดลงที่ 2.3 แอมแปร์ที่เวลาประมาณ 2 นาที จากนั้นก็คงที่

- หลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 20°C

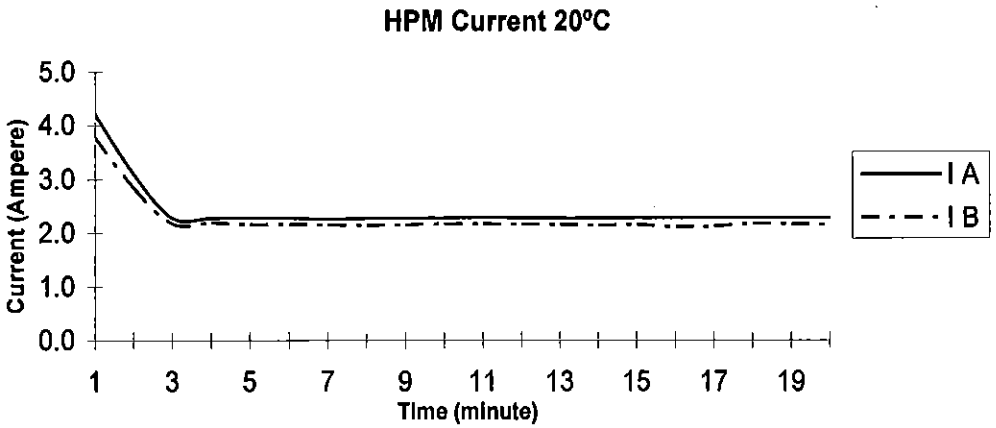


รูปที่ 4.16 หลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 20°C



รูปที่ 4.17 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 20°C

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (V_{AC}) มีค่าประมาณ 223 โวลต์ คงที่ตลอด ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{AB}) จะมีค่าสูงขณะเริ่มจุดหลอด แล้วลดลงจนเริ่มคงที่อยู่ที่ 160 โวลต์ที่เวลา 3 นาที และแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{BC}) เมื่อเริ่มจุดหลอดมีค่าต่ำ แล้วเพิ่มสูงขึ้น แล้วคงที่ที่ประมาณ 131 โวลต์ ที่เวลา 3 นาที

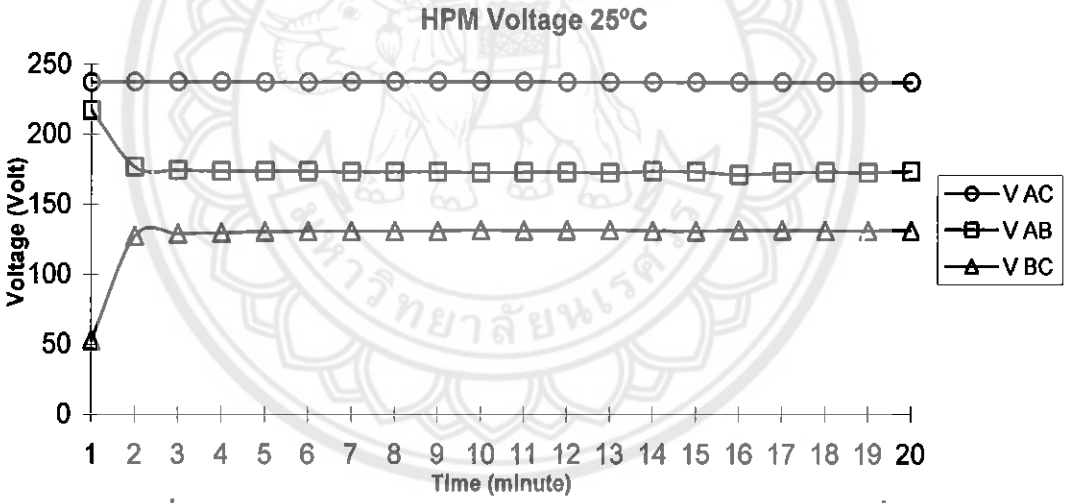


รูปที่ 4.18 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 20°C

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่า กระแสเข้าบัลลาสต์ (I_A) มีค่าสูงในตอนเริ่มจุดหลอดแล้วลดลงจนถึง 2.28 แอมแปร์ ที่เวลา 4 นาที จากนั้นกระแสก็เริ่มคงที่ และกระแสที่เข้าหลอดไฟ (I_B) แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

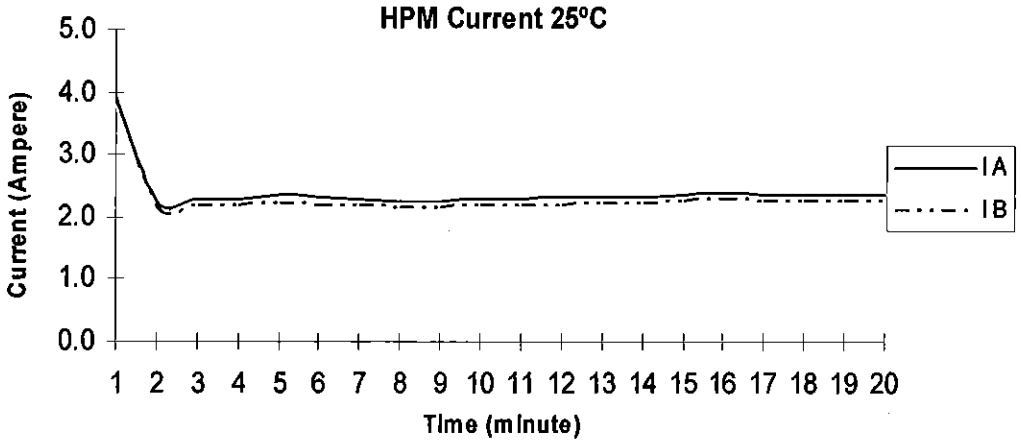
- หลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 25°C

รูปที่ 4.19 หลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 25°C



รูปที่ 4.20 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 25°C

จากรูปที่ 4.20 จะเห็นว่าแรงดันที่จ่ายให้กับวงจร (V_{AC}) มีค่าคงที่ที่ 237 โวลต์ ตลอด ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{AB}) มีค่าสูงขณะจุดหลอดติดแล้วลดลงมาคงที่ที่ 173 โวลต์ ที่เวลา 4 นาที และแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{BC}) เมื่อเริ่มจุดหลอดจะมีค่าต่ำแล้วเพิ่มขึ้นมาเรื่อยๆ จนถึง 129 โวลต์ ที่เวลา 3 นาที แล้วหลังจากนั้นก็เริ่มคงที่ที่ 131 โวลต์

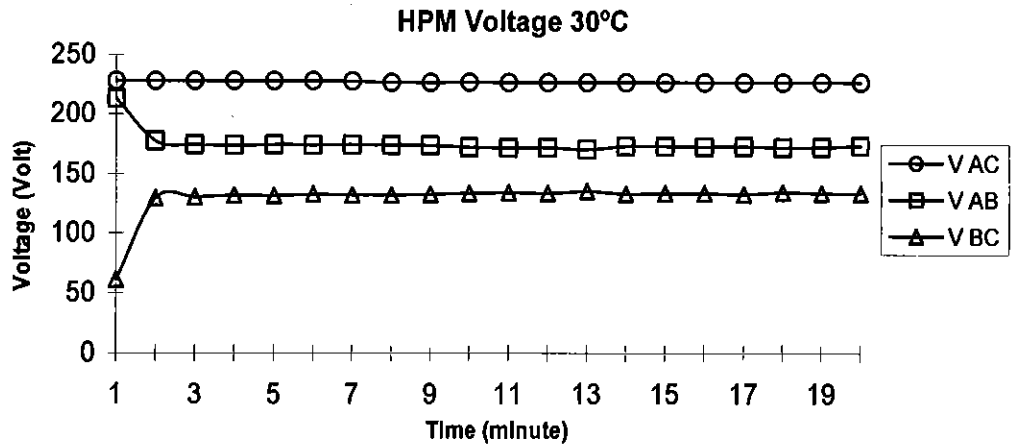


รูปที่ 4.21 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 25°C

จากรูปที่ 4.21 จะเห็นว่า กระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_A) เมื่อเริ่มจุดหลอดมีค่ากระแสที่สูง แล้วลดลงถึงประมาณ 2.3 แอมแปร์ ที่เวลา 2 นาที จากนั้นก็เริ่มคงที่ เช่นเดียวกับ กระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_B) จะมีค่าสูงขณะจุดหลอดถึง 3.8 แอมแปร์ ในนาทีแรก จากนั้นก็ลดต่ำลงมาแล้วเริ่มคงที่ที่ 2.2 แอมแปร์จากนั้นก็คงที่ที่เวลา 3 นาที

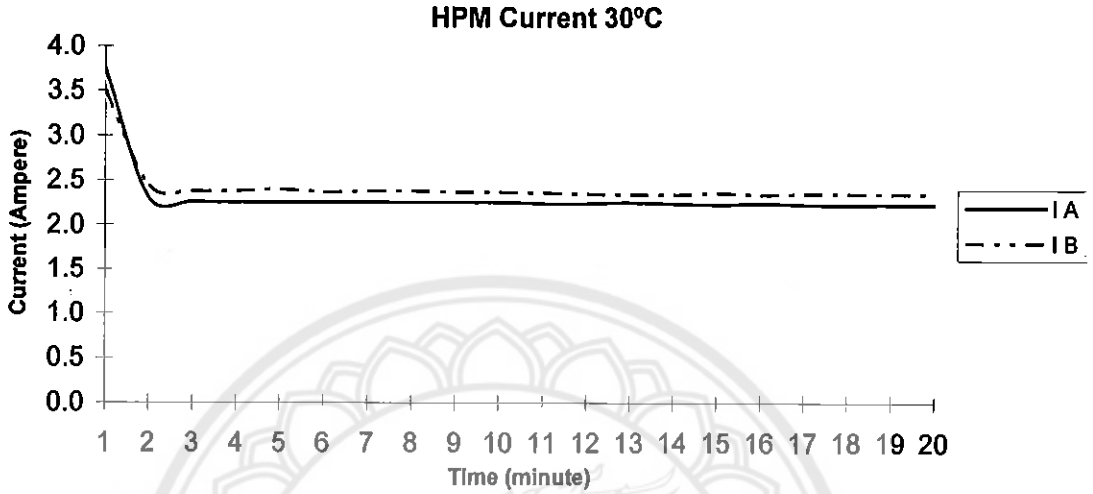
- หลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 30°C

รูปที่ 4.22 หลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 30°C



รูปที่ 4.23 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 30°C

จากรูปที่ 4.23 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (V_{AC}) คงที่ตลอดที่ประมาณ 227 โวลต์ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{AB}) มีค่าสูงขณะเริ่มจุดหลอด แล้วลดลงไปที่ 175 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 2.5 นาที จากนั้นก็เริ่มคงที่ที่ 172 โวลต์ และแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{BC}) มีค่าต่ำเมื่อเริ่มจุดหลอด แล้วเพิ่มสูงขึ้นที่ 130 โวลต์ที่เวลาประมาณ 2.5 นาที จากนั้นก็เริ่มคงที่ที่ 133 โวลต์

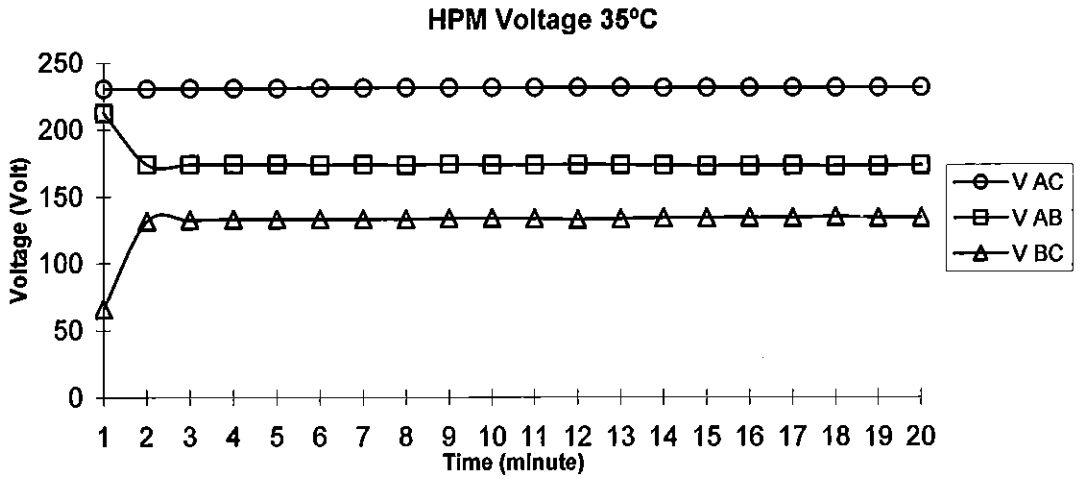


รูปที่ 4.24 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 30°C

จากรูปที่ 4.24 จะเห็นว่า กระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_A) เมื่อเริ่มจุดหลอดจะมีค่าสูงแล้วลดลงมาที่ 2.3 แอมแปร์ ที่เวลา 2 นาที หลังจากนั้นก็เริ่มคงที่ที่ประมาณ 2.2 แอมแปร์ เช่นเดียวกันกับ กระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_B) เมื่อเริ่มจุดหลอดจะมีค่าสูง แล้วลดลงมาที่ 2.4 แอมแปร์ ที่เวลา 2.5 นาที หลังจากนั้นก็เริ่มคงที่ที่ประมาณ 2.3 แอมแปร์

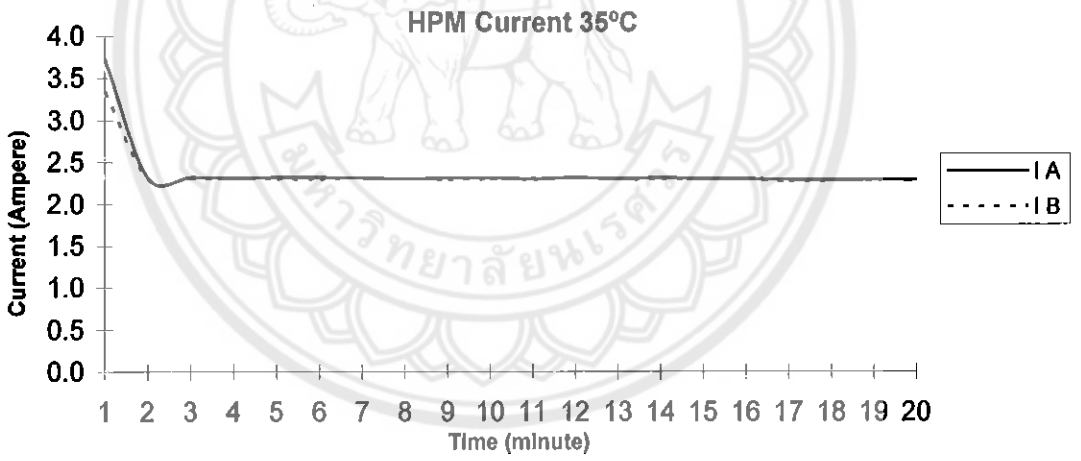
- หลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 35°C

รูปที่ 4.25 หลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 35°C



รูปที่ 4.26 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 35°C

จากรูปที่ 4.26 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (V_{AC}) จะมีค่าคงที่ตลอดที่ประมาณ 230 โวลต์ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{AB}) มีค่าสูงขณะเริ่มจุดหลอดและลดลงมาอยู่ที่ 174 โวลต์ ที่เวลา 2 นาที หลังจากนั้นก็เริ่มคงที่ และแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{BC}) มีค่าที่ต่ำเมื่อเริ่มจุดหลอดแล้วเพิ่มสูงขึ้นที่ 132 โวลต์ ที่เวลา 2 นาที หลังจากนั้นก็เริ่มคงที่



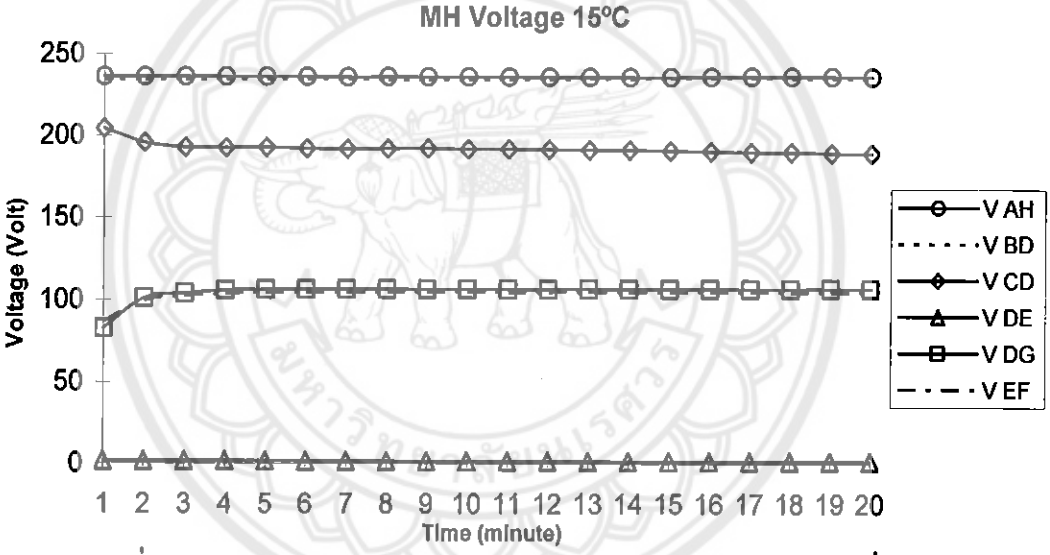
รูปที่ 4.27 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 35°C

จากรูปที่ 4.27 จะเห็นว่า กระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_A) เมื่อเริ่มจุดหลอดจะมีกระแสสูง โดยในนาทีแรกกระแสสูงถึง 3.7 แอมแปร์ แล้วลดลงมาที่ 2.3 แอมแปร์ ที่เวลา 2 นาที หลังจากนั้นก็เริ่มคงที่ เช่นเดียวกับกระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_B) ในนาทีแรกสูงถึง 3.3 แอมแปร์ แล้วลดลงมาที่ 2.3 แอมแปร์ ที่เวลา 2 นาที หลังจากนั้นก็คงที่

4.2.2 หลอดเมทัลฮาไลด์

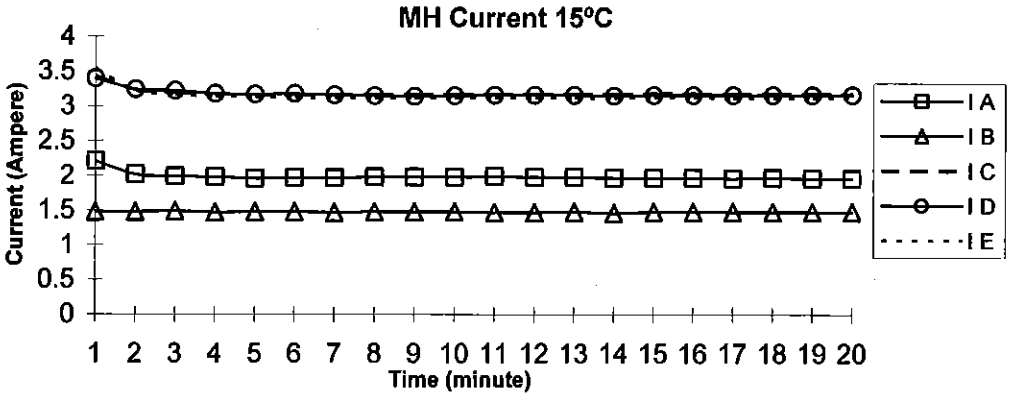
- หลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 15°C

รูปที่ 4.28 หลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 15°C



รูปที่ 4.29 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 15°C

จากรูปที่ 4.29 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (V_{AH}) กับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{BD}) มีค่าใกล้เคียงกัน และคงที่ที่ประมาณ 235 โวลต์ ตลอด ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{CD}) เมื่อเริ่มจุดหลอดจะมีค่าสูงแล้วลดลง โดยที่นาทีแรกมีแรงดันสูงถึง 204 โวลต์ จากนั้นก็ลดลงมาเรื่อยๆ จนคงที่ที่ 192 โวลต์ ที่เวลา 4 นาที ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมตัวจุดหลอด (V_{DE}) มีค่าคงที่ที่น้อยมาก แรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{EF}) เมื่อเริ่มจุดหลอดจะมีค่าต่ำแล้วเพิ่มสูงขึ้นในเวลาต่อมา โดยที่นาทีแรกมีแรงดัน 87 โวลต์ หลังจากนั้นก็เริ่มคงที่ที่ 105 โวลต์ เช่นเดียวกันแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟและตัวจุดหลอด (V_{DG})

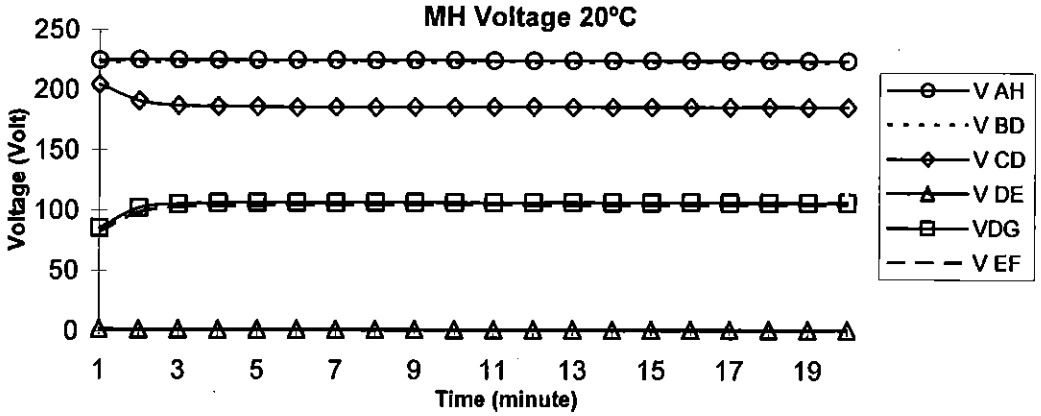


รูปที่ 4.30 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 15°C

จากรูปที่ 4.30 จะเห็นว่า กระแสเข้าวงจร (I_A) มีค่าประมาณ 2.2 แอมแปร์ที่นาทีแรก แล้วลดลงมาเหลือ 2 แอมแปร์ ที่เวลา 2 นาที หลังจากนั้นก็คงที่ กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ (I_B) คงที่ตลอดที่ประมาณ 1.5 แอมแปร์ ส่วนกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_C) กระแสที่ไหลเข้าตัวจุดหลอด (I_D) และกระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_E) จะมีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดแล้วลดต่ำลง โดยที่เวลา 1 นาที กระแสจะอยู่ที่ประมาณ 3.5 แอมแปร์ หลังจากนั้นคงที่ที่ 3.2 แอมแปร์ ที่เวลาประมาณ 3 นาที

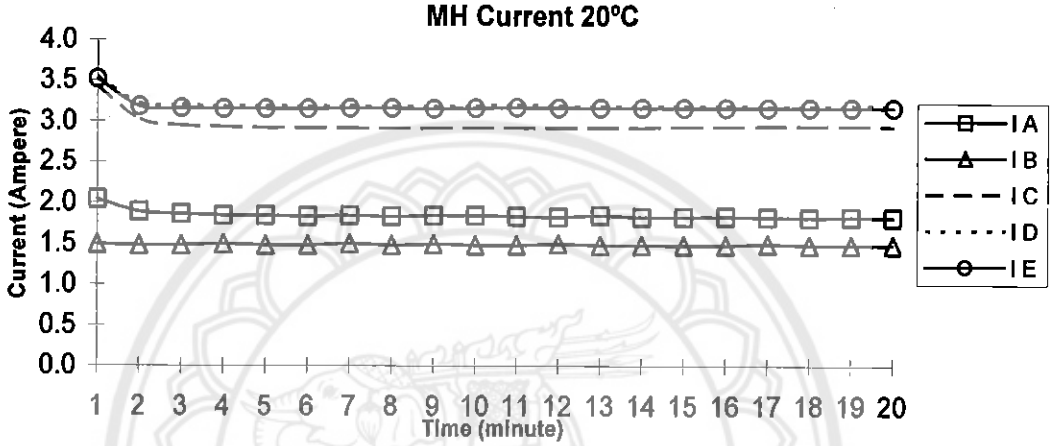
- หลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 20

รูปที่ 4.31 หลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 20°C



รูปที่ 4.32 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 20°C

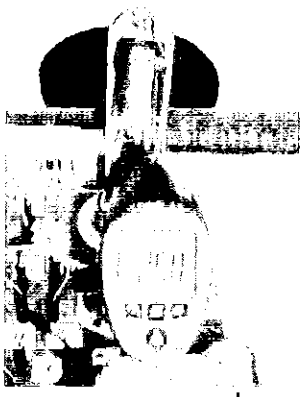
จากรูปที่ 4.32 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (V_{AH}) กับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{BD}) มีค่าใกล้เคียงกัน และคงที่ที่ประมาณ 225 โวลต์ ตลอด ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{CD}) เมื่อเริ่มจุดหลอดจะมีค่าสูงแล้วลดลง โดยที่นาทีแรกมีแรงดันสูงถึง 204 โวลต์ จากนั้นก็ลดลงมาเรื่อยๆ จนคงที่ที่ 187 โวลต์ ที่เวลา 3 นาที ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมตัวจุดหลอด (V_{DE}) มีค่าคงที่ที่น้อยมาก แรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{EF}) เมื่อเริ่มจุดหลอดจะมีค่าต่ำแล้วเพิ่มสูงขึ้นในเวลาต่อมา โดยที่นาทีแรกมีแรงดัน 82 โวลต์ หลังจากนั้นก็เริ่มคงที่ที่ 104 โวลต์ ที่เวลา 4 นาที เช่นเดียวกันแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟและตัวจุดหลอด (V_{DG})



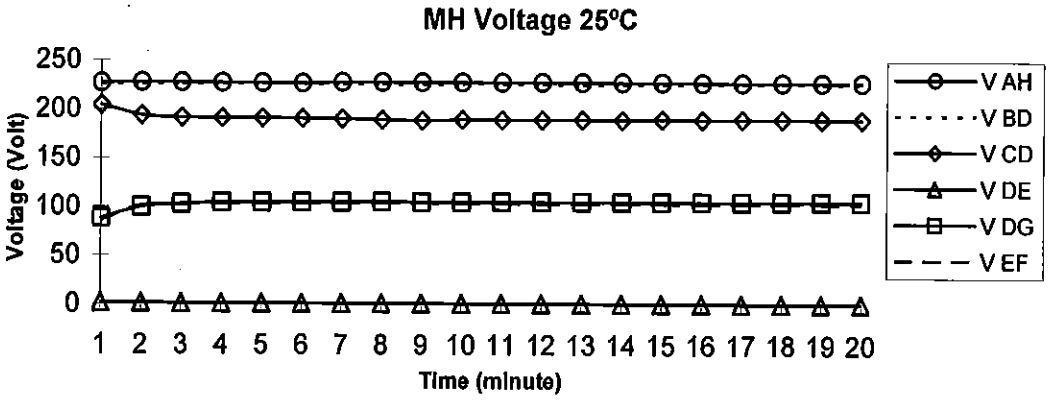
รูปที่ 4.33 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 20°C

จากรูปที่ 4.33 จะเห็นว่า กระแสเข้าวงจร (I_A) มีค่าประมาณ 2 แอมแปร์ที่นาทีแรก แล้วลดลงมาเหลือ 1.8 แอมแปร์ ที่เวลา 4 นาที หลังจากนั้นก็คงที่ กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ (I_B) คงที่ตลอดที่ประมาณ 1.5 แอมแปร์ ส่วนกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_C) จะมีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดแล้วลดต่ำลง โดยที่เวลา 1 นาที กระแสจะอยู่ที่ประมาณ 3.4 แอมแปร์ หลังจากนั้นคงที่ที่ 2.9 แอมแปร์ ที่เวลาประมาณ 4 นาที ส่วนกระแสที่ไหลเข้าตัวจุดหลอด (I_D) และกระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_E) จะมีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดแล้วลดต่ำลง โดยที่เวลา 1 นาที กระแสจะอยู่ที่ประมาณ 3.5 แอมแปร์ หลังจากนั้นคงที่ที่ 3.2 แอมแปร์ ที่เวลาประมาณ 3 นาที

- หลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 25°C

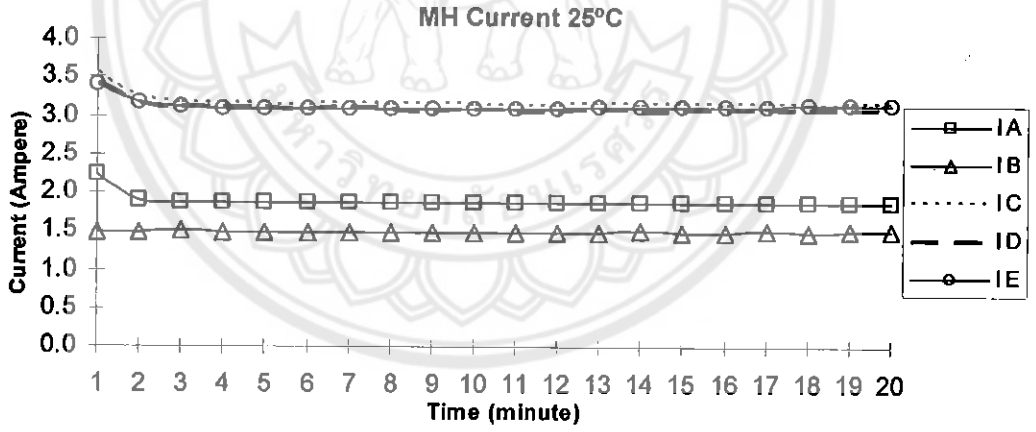


รูปที่ 4.34 หลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 25°C



รูปที่ 4.35 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 25°C

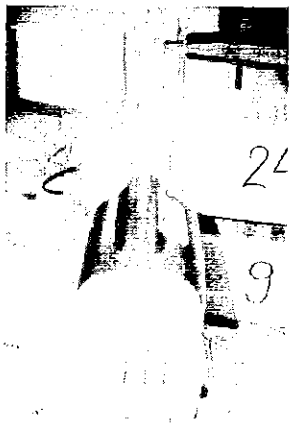
จากรูปที่ 4.35 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (V_{AH}) กับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{BD}) มีค่าใกล้เคียงกัน และคงที่ที่ประมาณ 228 โวลต์ ตลอด ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{CD}) เมื่อเริ่มจุดหลอดจะมีค่าสูงแล้วลดลง โดยที่นาทีแรกมีแรงดันสูงถึง 204 โวลต์ จากนั้นก็ลดลงมาเรื่อยๆ จนคงที่ที่ 190 โวลต์ ที่เวลา 7 นาที ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมตัวจุดหลอด (V_{DE}) มีค่าคงที่ที่น้อยมาก แรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{EF}) เมื่อเริ่มจุดหลอดจะมีค่าต่ำแล้วเพิ่มสูงขึ้นในเวลาต่อมา โดยที่นาทีแรกมีแรงดัน 85 โวลต์ หลังจากนั้นก็เริ่มคงที่ที่ 104 โวลต์ ที่เวลา 7 นาที เช่นเดียวกันแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟและตัวจุดหลอด (V_{DG})



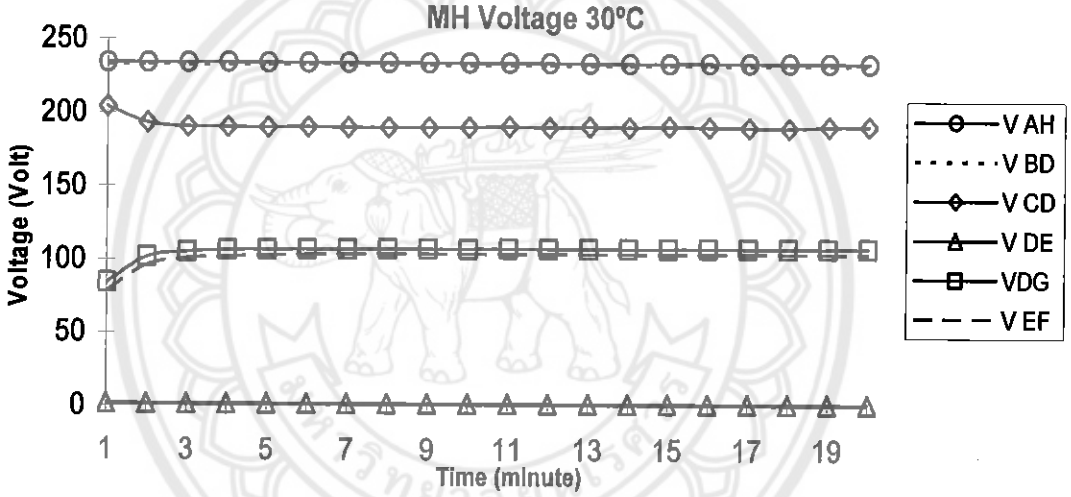
รูปที่ 4.36 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 25°C

จากรูปที่ 4.36 จะเห็นว่า กระแสเข้าวงจร (I_A) มีค่าประมาณ 2.2 แอมแปร์ที่นาทีแรก แล้วลดลงมาเหลือ 1.9 แอมแปร์ ที่เวลา 2 นาที หลังจากนั้นก็คงที่ กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ (I_B) คงที่ตลอดที่ประมาณ 1.5 แอมแปร์ ส่วนกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_C) จะมีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดแล้วลดต่ำลง โดยที่เวลา 1 นาที กระแสจะอยู่ที่ประมาณ 3.6 แอมแปร์ หลังจากนั้นคงที่ที่ 3.2 แอมแปร์ ที่เวลาประมาณ 2.5 นาที ส่วนกระแสที่ไหลเข้าตัวจุดหลอด (I_D) และกระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_E) จะมีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดแล้วลดต่ำลง โดยที่เวลา 1 นาที กระแสจะอยู่ที่ประมาณ 3.4 แอมแปร์ หลังจากนั้นคงที่ที่ 3.1 แอมแปร์ ที่เวลาประมาณ 3 นาที

- หลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 30°C

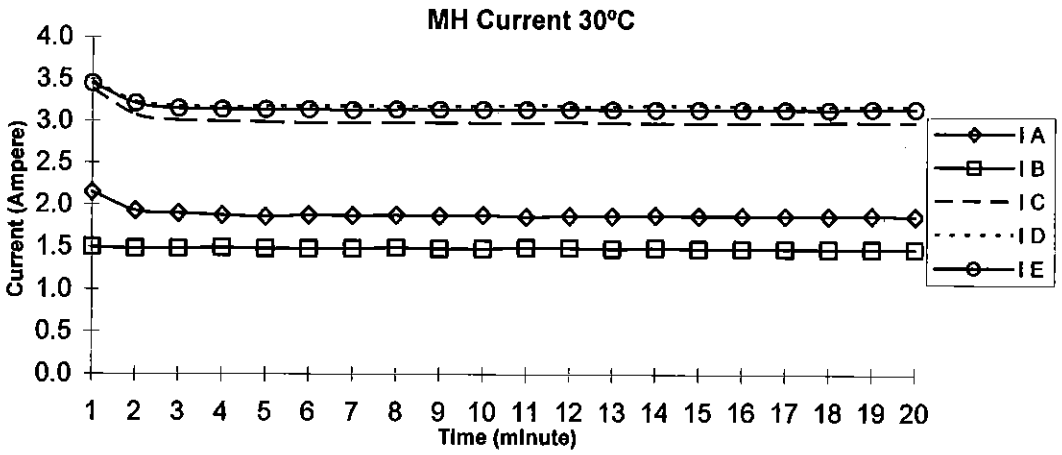


รูปที่ 4.37 หลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 30°C



รูปที่ 4.38 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 30°C

จากรูปที่ 4.38 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (V_{AH}) กับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{BD}) มีค่าใกล้เคียงกัน และคงที่ที่ประมาณ 234 โวลต์ ตลอด ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{CD}) เมื่อเริ่มจุดหลอดจะมีค่าสูงแล้วลดลง โดยที่นาทีแรกมีแรงดันสูงถึง 204 โวลต์ จากนั้นก็ลดลงมาเรื่อยๆ จนคงที่ที่ 190 โวลต์ ที่เวลา 5 นาที ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมตัวจุดหลอด (V_{DE}) มีค่าคงที่ที่น้อยมาก แรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{EF}) เมื่อเริ่มจุดหลอดจะมีค่าต่ำแล้วเพิ่มสูงขึ้นในเวลาต่อมา โดยที่นาทีแรกมีแรงดัน 78 โวลต์ หลังจากนั้นก็เริ่มคงที่ที่ 104 โวลต์ ที่เวลา 10 นาที เช่นเดียวกันแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟและตัวจุดหลอด (V_{DG})

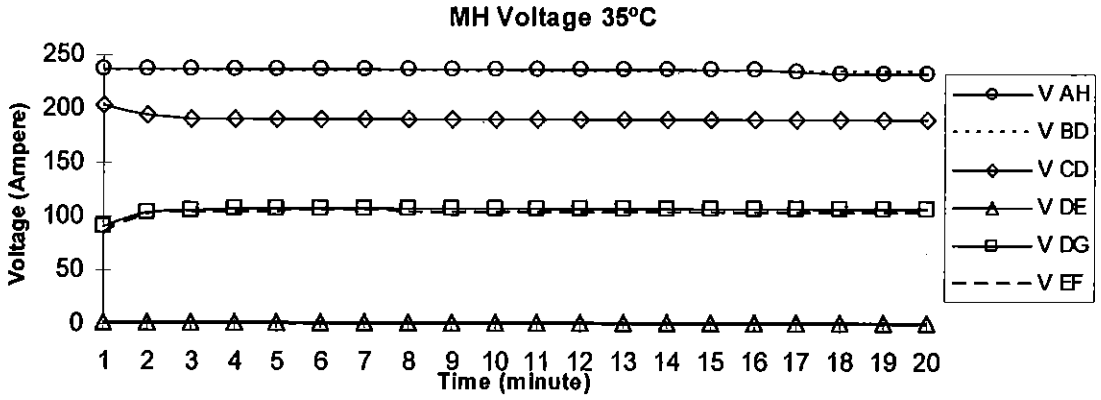


รูปที่ 4.39 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 30°C

จากรูปที่ 4.39 จะเห็นว่า กระแสเข้าวงจร (I_A) มีค่าประมาณ 2.1 แอมแปร์ที่นาทีแรก แล้วลดลงมาเหลือ 1.9 แอมแปร์ ที่เวลา 3 นาที หลังจากนั้นก็คงที่ กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ (I_B) คงที่ตลอดที่ประมาณ 1.5 แอมแปร์ ส่วนกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_C) จะมีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดแล้วลดต่ำลง โดยที่เวลา 1 นาที กระแสจะอยู่ที่ประมาณ 3.4 แอมแปร์ หลังจากนั้นคงที่ที่ 3 แอมแปร์ ที่เวลาประมาณ 4 นาที ส่วนกระแสที่ไหลเข้าตัวจุดหลอด (I_D) และกระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_E) จะมีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดแล้วลดต่ำลง โดยที่เวลา 1 นาที กระแสจะอยู่ที่ประมาณ 3.4 แอมแปร์ หลังจากนั้นคงที่ที่ 3.1 แอมแปร์ ที่เวลาประมาณ 4 นาที

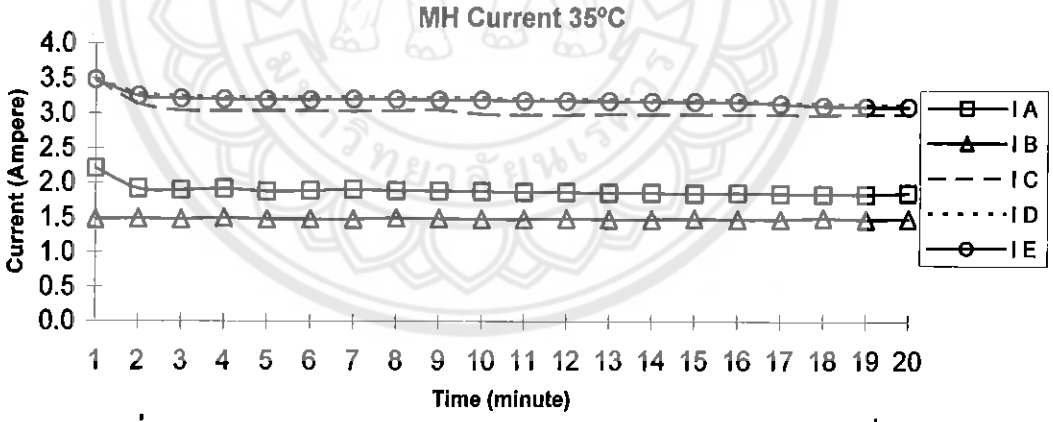
- หลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 35°C

รูปที่ 4.40 หลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 35°C



รูปที่ 4.41 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 35°C

จากรูปที่ 4.41 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (V_{AH}) กับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{BD}) มีค่าใกล้เคียงกัน และคงที่ที่ประมาณ 236 โวลต์ ตลอด ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{CD}) เมื่อเริ่มจุดหลอดจะมีค่าสูงแล้วลดลง โดยที่นาทีแรกมีแรงดันสูงถึง 202 โวลต์ จากนั้นก็ลดลงมาเรื่อยๆ จนคงที่ที่ 190 โวลต์ ที่เวลา 6 นาที ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมตัวจุดหลอด (V_{DE}) มีค่าคงที่ที่น้อยมาก แรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{EF}) เมื่อเริ่มจุดหลอดจะมีค่าต่ำแล้วเพิ่มสูงขึ้นในเวลาต่อมา โดยที่นาทีแรกมีแรงดัน 82 โวลต์ หลังจากนั้นก็เริ่มคงที่ที่ 104 โวลต์ ที่เวลา 3 นาที เช่นเดียวกันแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟและตัวจุดหลอด (V_{DG})



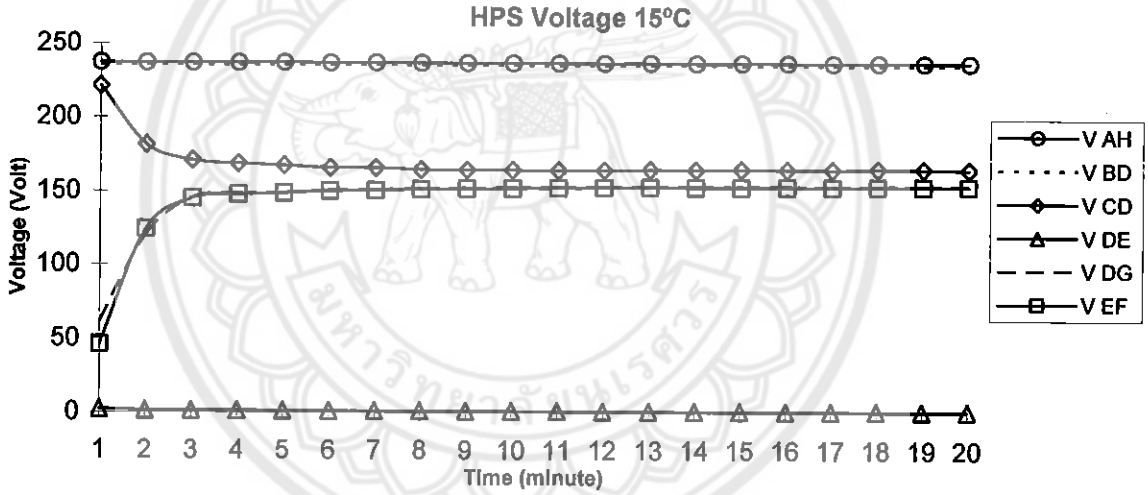
รูปที่ 4.42 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่ 35°C

จากรูปที่ 4.42 จะเห็นว่า กระแสเข้าวงจร (I_A) มีค่าประมาณ 2.2 แอมแปร์ที่นาทีแรก แล้วลดลงมาเหลือ 1.9 แอมแปร์ ที่เวลา 3 นาที หลังจากนั้นก็คงที่ กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ (I_B) คงที่ตลอดที่ประมาณ 1.5 แอมแปร์ ส่วนกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_C) จะมีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดแล้วลดต่ำลง โดยที่เวลา 1 นาที กระแสจะอยู่ที่ประมาณ 3.5 แอมแปร์ หลังจากนั้นคงที่ที่ 3 แอมแปร์ ที่เวลาประมาณ 10 นาที ส่วนกระแสที่ไหลเข้าตัวจุดหลอด (I_D) และกระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_E) จะมีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดแล้วลดต่ำลง โดยที่เวลา 1 นาที กระแสจะอยู่ที่ประมาณ 3.5 แอมแปร์ หลังจากนั้นคงที่ที่ 3.2 แอมแปร์ ที่เวลาประมาณ 4 นาที

4.2.2 หลอดโซเดียมความดันสูง

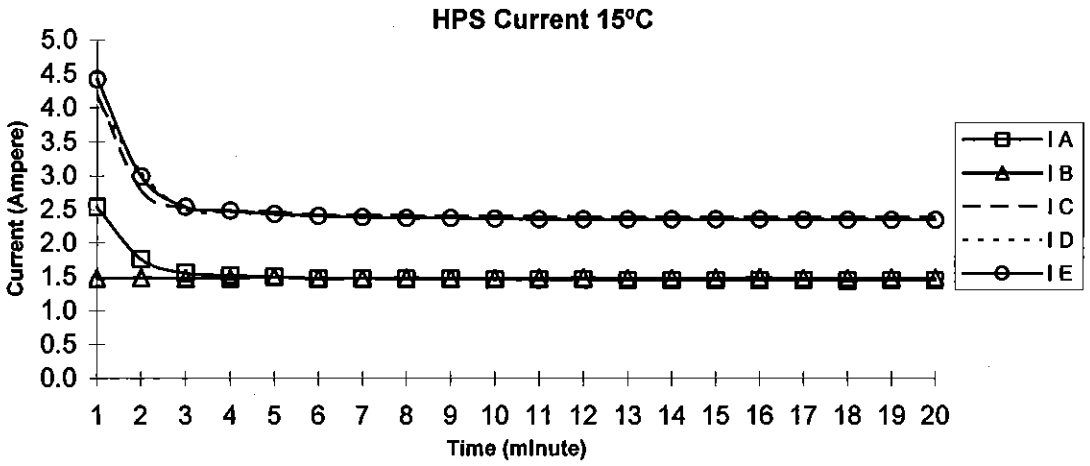
- หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 15°C

รูปที่ 4.43 หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 15°C



รูปที่ 4.44 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 15°C

จากรูปที่ 4.44 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (V_{AH}) และแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{BD}) มีค่าคงที่ที่ 237 โวลต์ แรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{CD}) ในช่วงเริ่มจุดหลอดจะมีค่าสูงแล้วหลังจากนั้นก็ลดลงจนคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีแรงดัน 221 โวลต์ แล้วลดลงมาคงที่ที่ 165 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 7.5 นาที ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{EF}) ในช่วงเริ่มจุดหลอดจะมีค่าต่ำ แล้วหลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นจนคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีแรงดัน 46 โวลต์ แล้วเพิ่มขึ้นมาคงที่ที่ 152 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 9 นาที เช่นเดียวกับแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างหลอดไฟและตัวจุดหลอด (V_{DG})

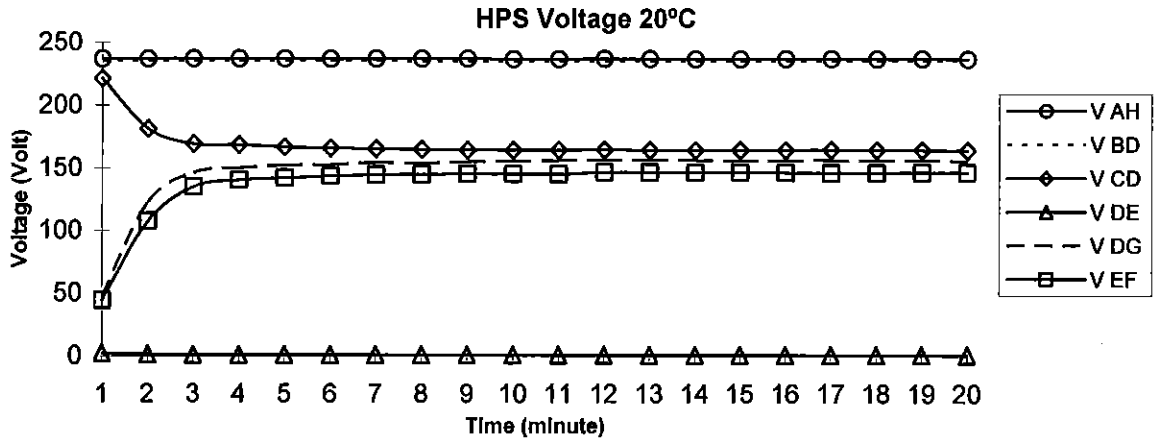


รูปที่ 4.45 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดัน**สูงที่** 15°C

จากรูปที่ 4.45 จะเห็นว่า กระแสที่ไหลเข้าวงจร (I_A) มีค่าสูงเมื่อเริ่มจุด**หลอดจากนั้นก็ค่อยๆ ลดลงมาคงที่** โดยที่เวลา 1 นาที มีกระแส 2.5 แอมแปร์ แล้วลดลงมาคงที่ที่ 1.45 แอม**แปร์ ที่เวลา** 7 **นาที กระแสที่ไหล**เข้าตัวเก็บประจุ (I_B) มีค่าคงที่ประมาณ 1.5 แอมแปร์ ส่วนกระแสที่**ไหลเข้าบัลลาสต์** (I_C) **กระแสที่ไหล**เข้าตัวจุดหลอด (I_D) และกระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_E) มีค่าสูงเมื่อเริ่ม**จุดหลอดจากนั้นก็ค่อยๆ ลดลง**มาคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีกระแส 4.2 แอมแปร์ แล้วลดลงมาคงที่ที่ 2.4 **แอมแปร์ ที่เวลา** 8 **นาที**

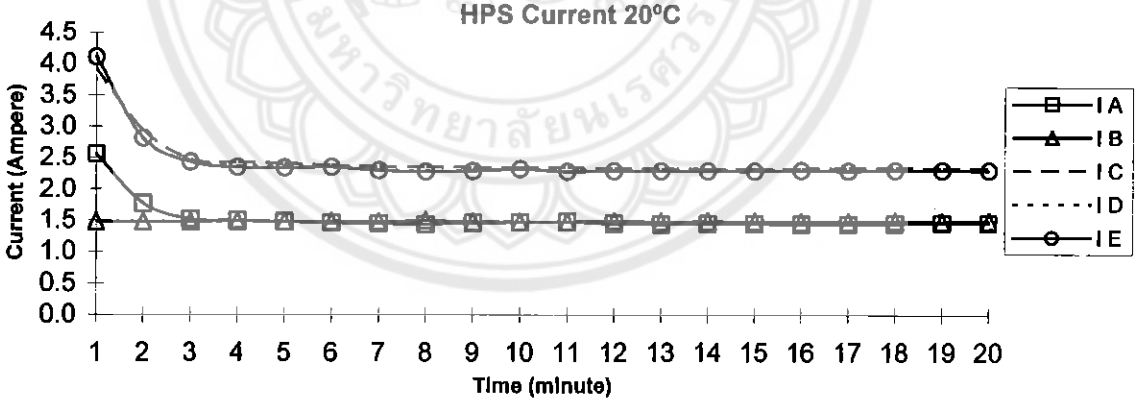
- หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 20°C

รูปที่ 4.46 หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 20°C



รูปที่ 4.47 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 20°C

จากรูปที่ 4.47 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (V_{AH}) และแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{BD}) มีค่าใกล้เคียงกันและคงที่ที่ 237 โวลต์ แรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{CD}) ในช่วงเริ่มจุดหลอดจะมีค่าสูงแล้วหลังจากนั้นก็ลดลงจนคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีแรงดัน 221 โวลต์ แล้วลดลงมาคงที่ที่ 165 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 8 นาที แรงดันที่ตกคร่อมตัวจุดหลอด (V_{DE}) มีค่าน้อยและคงที่ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{EF}) ในช่วงเริ่มจุดหลอดจะมีค่าต่ำ แล้วหลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นจนคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีแรงดัน 44 โวลต์ แล้วเพิ่มขึ้นมาคงที่ที่ 145 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 8 นาที เช่นเดียวกับแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างหลอดไฟและตัวจุดหลอด (V_{DG})

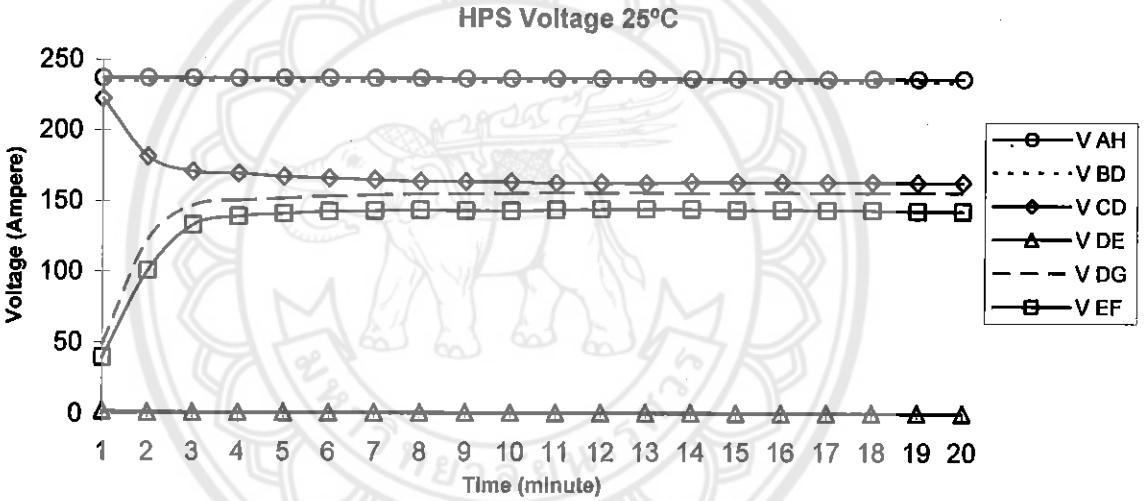


รูปที่ 4.48 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 20°C

จากรูปที่ 4.48 จะเห็นว่า กระแสที่ไหลเข้าวงจร (I_A) มีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดจากนั้นก็ค่อยๆ ลดลงมาคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีกระแส 2.6 แอมแปร์ แล้วลดลงมาคงที่ที่ 1.45 แอมแปร์ ที่เวลา 7 นาที กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ (I_B) มีค่าคงที่ประมาณ 1.5 แอมแปร์ ส่วนกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_C) กระแสที่ไหลเข้าตัวจุดหลอด (I_D) และกระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_E) มีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดจากนั้นก็ค่อยๆ ลดลงมาคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีกระแส 4.1 แอมแปร์ แล้วลดลงมาคงที่ที่ 2.3 แอมแปร์ ที่เวลา 7 นาที

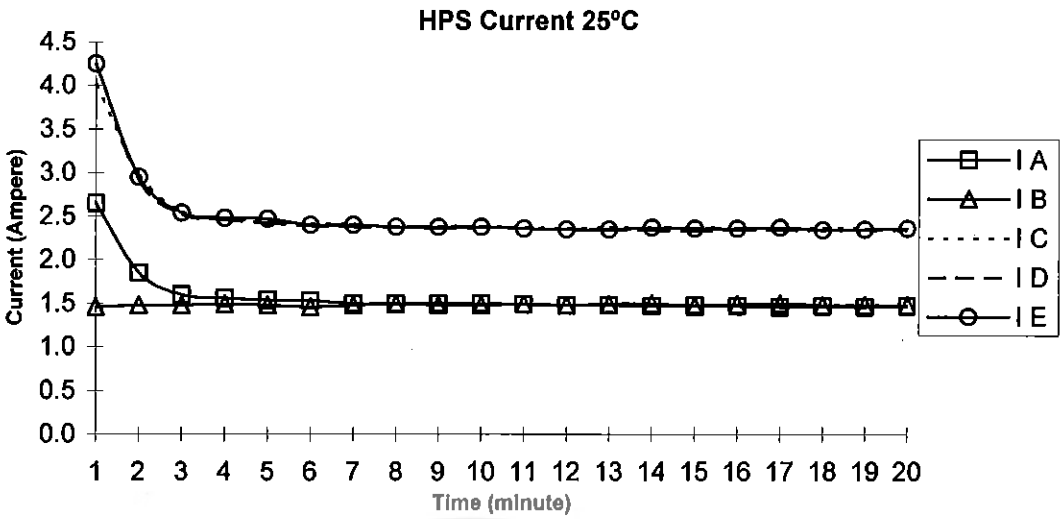
- หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 25°C

รูปที่ 4.49 หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 25°C



รูปที่ 4.50 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 25°C

จากรูปที่ 4.50 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (V_{AH}) และแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{BD}) มีค่าใกล้เคียงกันและคงที่ที่ 237 โวลต์ แรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{CD}) ในช่วงเริ่มจุดหลอดจะมีค่าสูงแล้วหลังจากนั้นก็ลดลงจนคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีแรงดัน 222 โวลต์ แล้วลดลงมาคงที่ที่ 164 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 9 นาที แรงดันที่ตกคร่อมตัวจุดหลอด (V_{DE}) มีค่าน้อยและคงที่ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{EF}) ในช่วงเริ่มจุดหลอดจะมีค่าต่ำ แล้วหลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นจนคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีแรงดัน 39 โวลต์ แล้วเพิ่มขึ้นมาคงที่ที่ 144 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 11 นาที เช่นเดียวกับแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างหลอดไฟและตัวจุดหลอด (V_{DG})

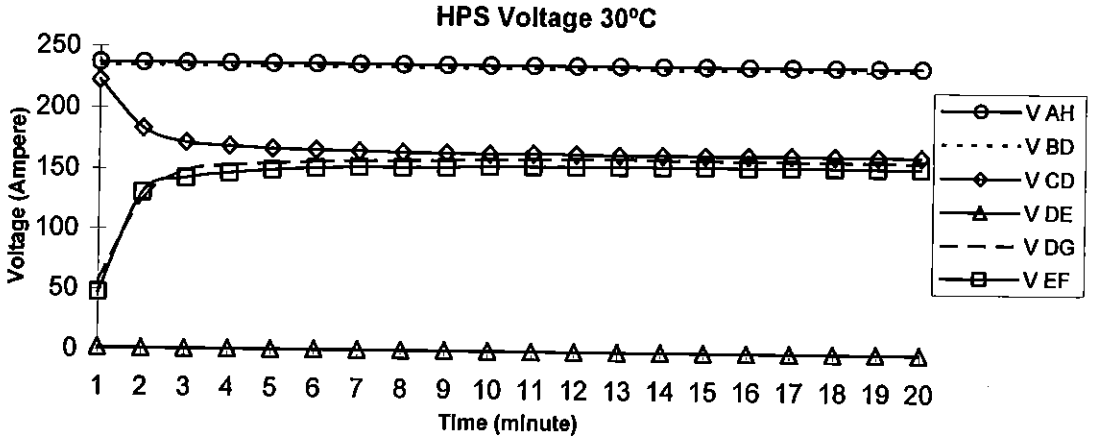


รูปที่ 4.51 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 25°C

จากรูปที่ 4.51 จะเห็นว่า กระแสที่ไหลเข้าวงจร (I_A) มีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดจากนั้นก็ค่อยๆ ลดลงมาคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีกระแส 2.6 แอมแปร์ แล้วลดลงมาคงที่ที่ 1.5 แอมแปร์ ที่เวลา 7 นาที กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ (I_B) มีค่าคงที่ประมาณ 1.5 แอมแปร์ ส่วนกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_C) กระแสที่ไหลเข้าตัวจุดหลอด (I_D) และกระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_E) มีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดจากนั้นก็ค่อยๆ ลดลงมาคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีกระแส 4.2 แอมแปร์ แล้วลดลงมาคงที่ที่ 2.4 แอมแปร์ ที่เวลา 6 นาที

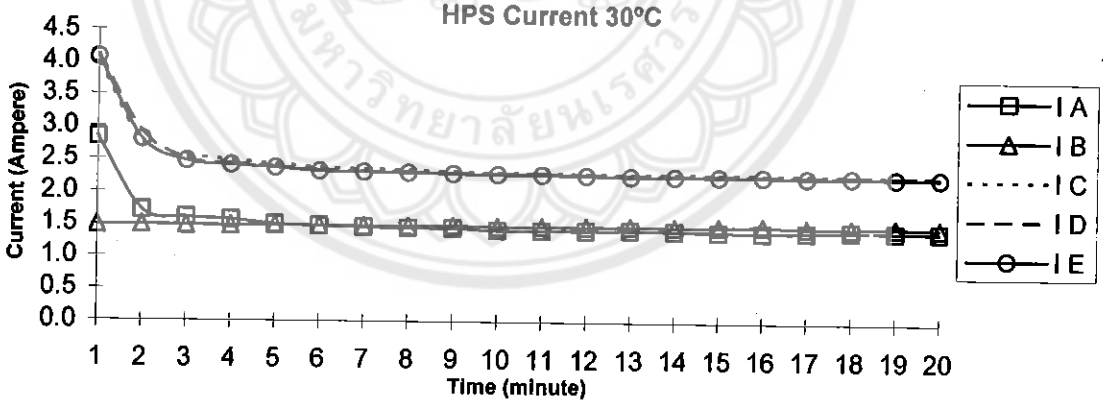
- หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 30°C

รูปที่ 4.52 หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 30°C



รูปที่ 4.53 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 30°C

จากรูปที่ 4.53 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (V_{AH}) และแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{BD}) มีค่าใกล้เคียงกันและคงที่ที่ 237 โวลต์ แรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{CD}) ในช่วงเริ่มจุดหลอดจะมีค่าสูงแล้วหลังจากนั้นก็ลดลงจนคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีแรงดัน 222 โวลต์ แล้วลดลงมาคงที่ที่ 165 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 8.5 นาที แรงดันที่ตกคร่อมตัวจุดหลอด (V_{DE}) มีค่าน้อยและคงที่ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{EF}) ในช่วงเริ่มจุดหลอดจะมีค่าต่ำ แล้วหลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นจนคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีแรงดัน 47 โวลต์ แล้วเพิ่มขึ้นมาคงที่ที่ 154 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 10 นาที เช่นเดียวกับแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างหลอดไฟและตัวจุดหลอด (V_{DG})

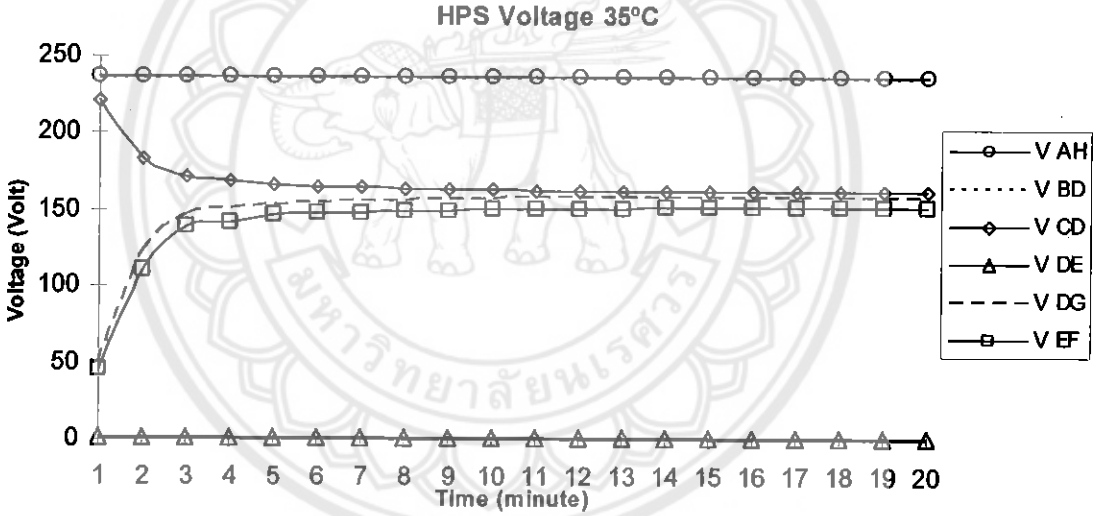


รูปที่ 4.54 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 30°C

จากรูปที่ 4.54 จะเห็นว่า กระแสที่ไหลเข้าวงจร (I_A) มีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดจากนั้นก็ค่อยๆ ลดลงมาคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีกระแส 2.8 แอมแปร์ แล้วลดลงมาคงที่ที่ 1.45 แอมแปร์ ที่เวลา 8 นาที กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ (I_B) มีค่าคงที่ประมาณ 1.5 แอมแปร์ ส่วนกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_C) กระแสที่ไหลเข้าตัวจุดหลอด (I_D) และกระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_E) มีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดจากนั้นก็ค่อยๆ ลดลงมาคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีกระแส 4.1 แอมแปร์ แล้วลดลงมาคงที่ที่ 2.3 แอมแปร์ ที่เวลา 9 นาที

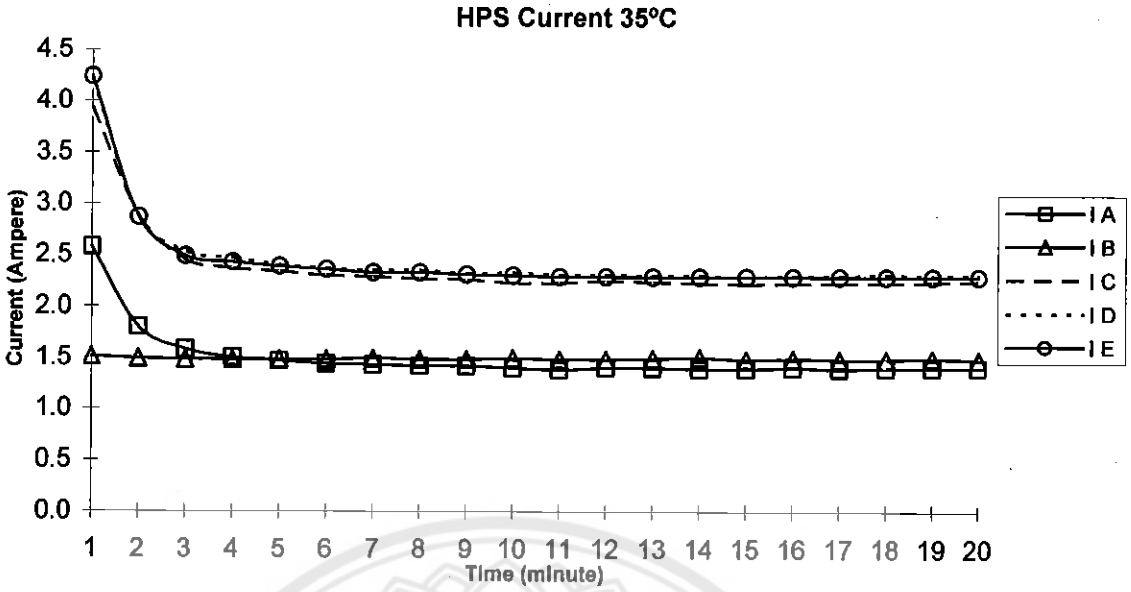
- หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 35°C

รูปที่ 4.55 หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 35°C



รูปที่ 4.56 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 35°C

จากรูปที่ 4.56 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (V_{AH}) และแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{BD}) มีค่าใกล้เคียงกันและคงที่ที่ 237 โวลต์ แรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ (V_{CD}) ในช่วงเริ่มจุดหลอดจะมีค่าสูงแล้วหลังจากนั้นก็ลดลงจนคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีแรงดัน 221 โวลต์ แล้วลดลงมาคงที่ที่ 163 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 13.5 นาที แรงดันที่ตกคร่อมตัวจุดหลอด (V_{DE}) มีค่าน้อยและคงที่ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟ (V_{EF}) ในช่วงเริ่มจุดหลอดจะมีค่าต่ำ แล้วหลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นจนคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีแรงดัน 45 โวลต์ แล้วเพิ่มขึ้นมาคงที่ที่ 151 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 12 นาที เช่นเดียวกับแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างหลอดไฟและตัวจุดหลอด (V_{DG})

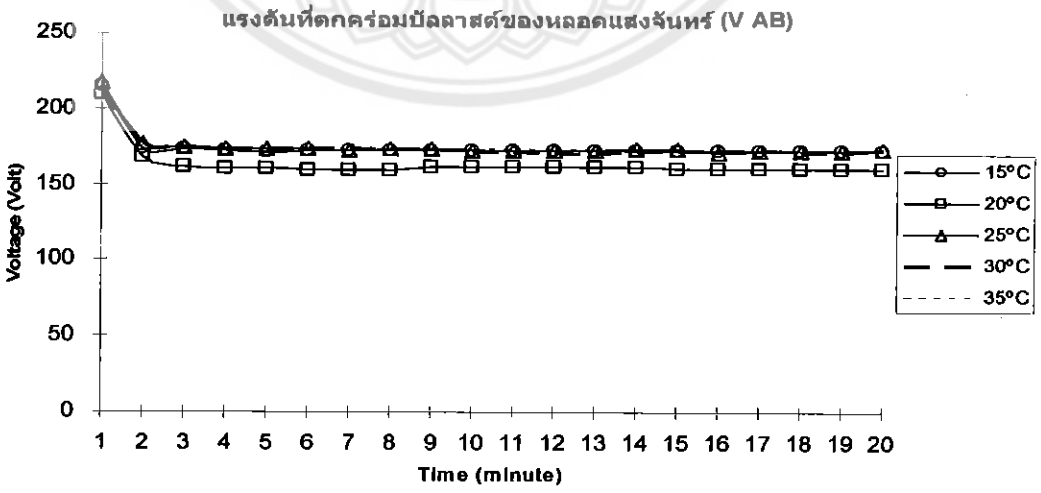


รูปที่ 4.57 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่ 35°C

จากรูปที่จะเห็นว่า กระแสที่ไหลเข้าวงจร (I_A) มีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดจากนั้นก็ค่อยๆ ลดลงมาคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีกระแส 2.6 แอมแปร์ แล้วลดลงมาคงที่ที่ 1.4 แอมแปร์ ที่เวลา 10 นาที กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ (I_B) มีค่าคงที่ประมาณ 1.5 แอมแปร์ ส่วนกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ (I_C) กระแสที่ไหลเข้าตัวจุดหลอด (I_D) และกระแสที่ไหลเข้าหลอดไฟ (I_E) มีค่าสูงเมื่อเริ่มจุดหลอดจากนั้นก็ค่อยๆ ลดลงมาคงที่ โดยที่เวลา 1 นาที มีกระแส 4.2 แอมแปร์ แล้วลดลงมาคงที่ที่ 2.3 แอมแปร์ ที่เวลา 10 นาที

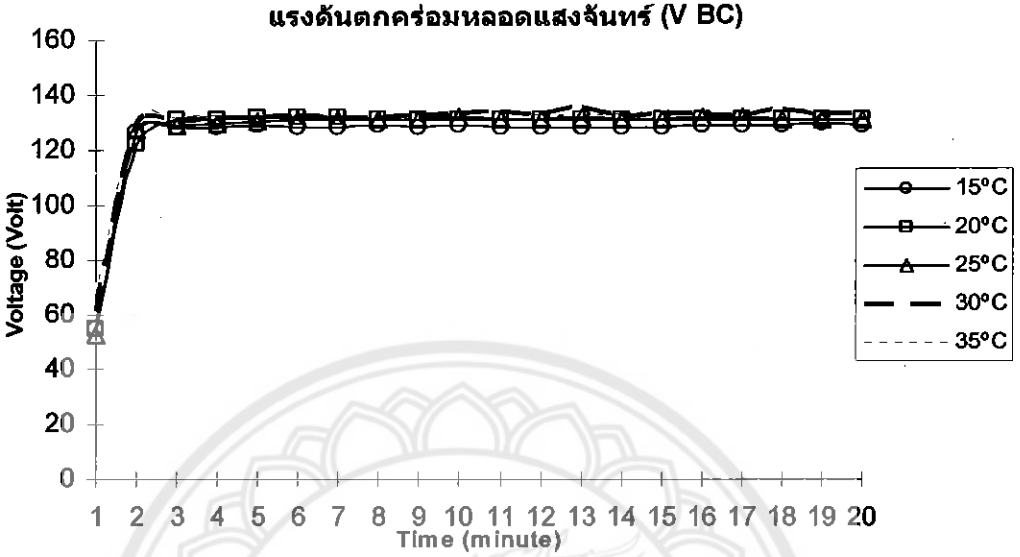
4.3 เปรียบเทียบแรงดันและกระแสของอุณหภูมิต่างๆ

4.3.1 หลอดแสงจันทร์



รูปที่ 4.58 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ของหลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.58 จะเห็นว่าอุณหภูมิไม่มีผลกระทบต่อ หน้าที่ของการจุดหลอดแสงจันทร์เลย แรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ก็ยังคงทำงานเป็นปกติ ส่วนแรงดันตกคร่อมบัลลาสต์ของหลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิ 20°C นั้น เกิดจากแรงดันจ่ายเข้าสู่วงจร (V_{AC}) ที่ต่ำกว่านั่นเอง

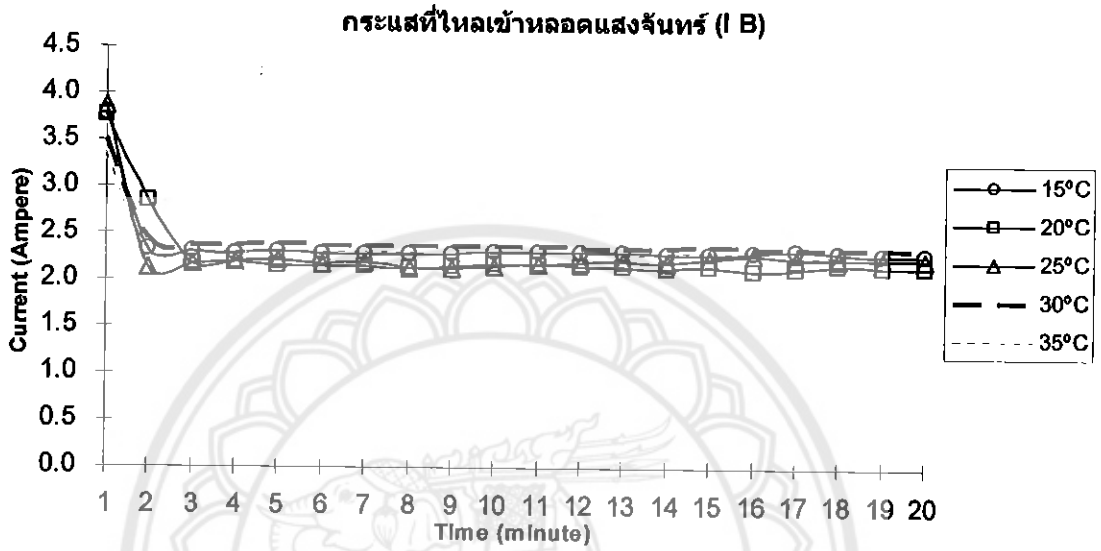


รูปที่ 4.59 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันที่ตกคร่อมหลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.59 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ลดลงไป ไม่มีผลกระทบต่อหน้าที่ในการจุดหลอดของแรงดันที่ตกคร่อมหลอดแสงจันทร์ (V_{EF}) เลย แผนภูมิของแรงดันแต่ละอุณหภูมิก็ยังคงเป็นไปตามปกติ

รูปที่ 4.60 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ของหลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

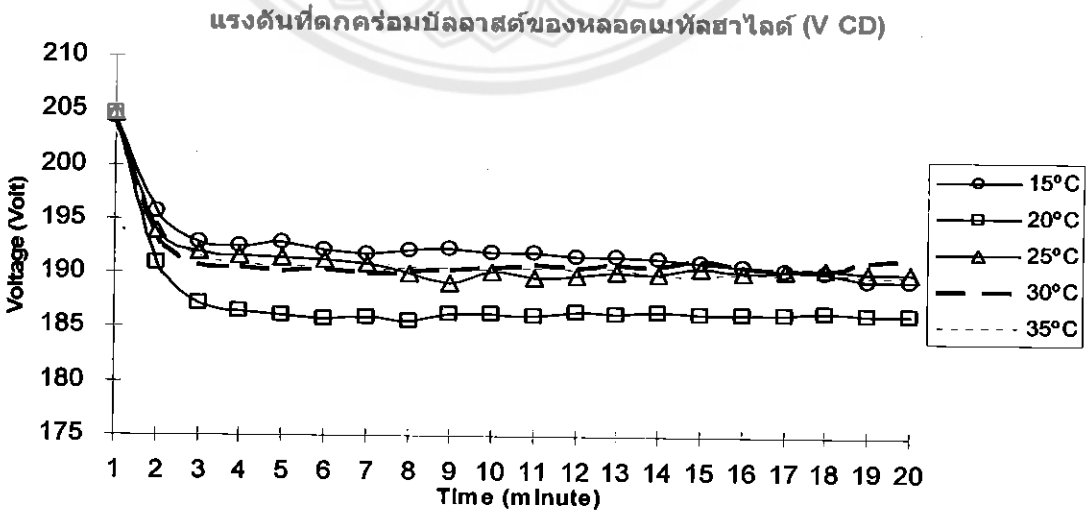
จากรูปที่ 4.60 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ลดลงไป ไม่มีผลกระทบต่อหน้าที่ของกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ ในการจุดหลอดแสงจันทร์เลย แผนภูมิของกระแสแต่ละอุณหภูมิก็ยังคงเป็นไปตามปกติ ส่วนที่เห็นแตกต่างในช่วง 4 นาทีแรกนั้น เกิดจากการใช้เครื่องมือวัดต่างชนิดกัน



รูปที่ 4.61 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสที่ไหลเข้าหลอดแสงจันทร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

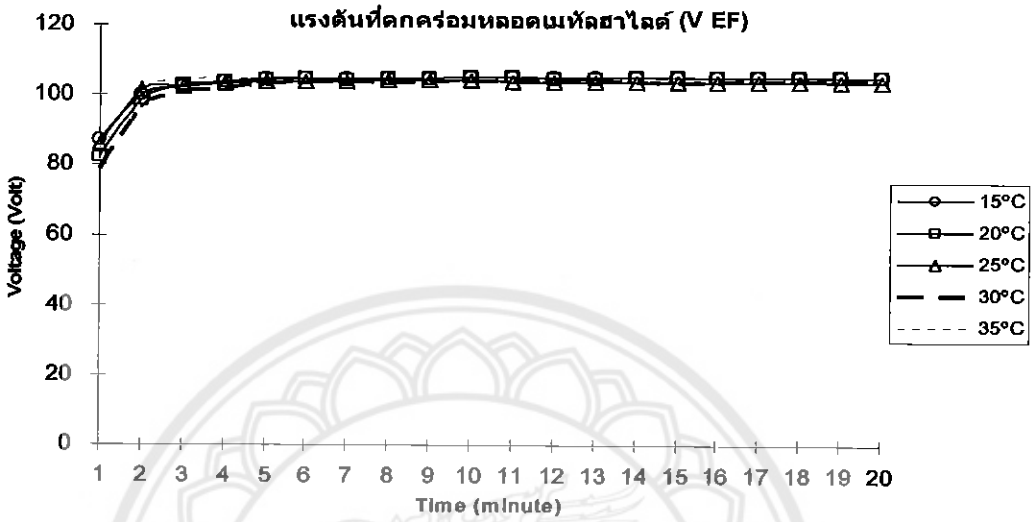
จากรูปที่ 4.61 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ลดลงไป ไม่มีผลกระทบต่อหน้าที่ของกระแสในการจุดหลอดแสงจันทร์เลย แผนภูมิของกระแสแต่ละอุณหภูมิก็ยังคงเป็นไปตามปกติ

4.3.2 หลอดเมทัลฮาไลด์



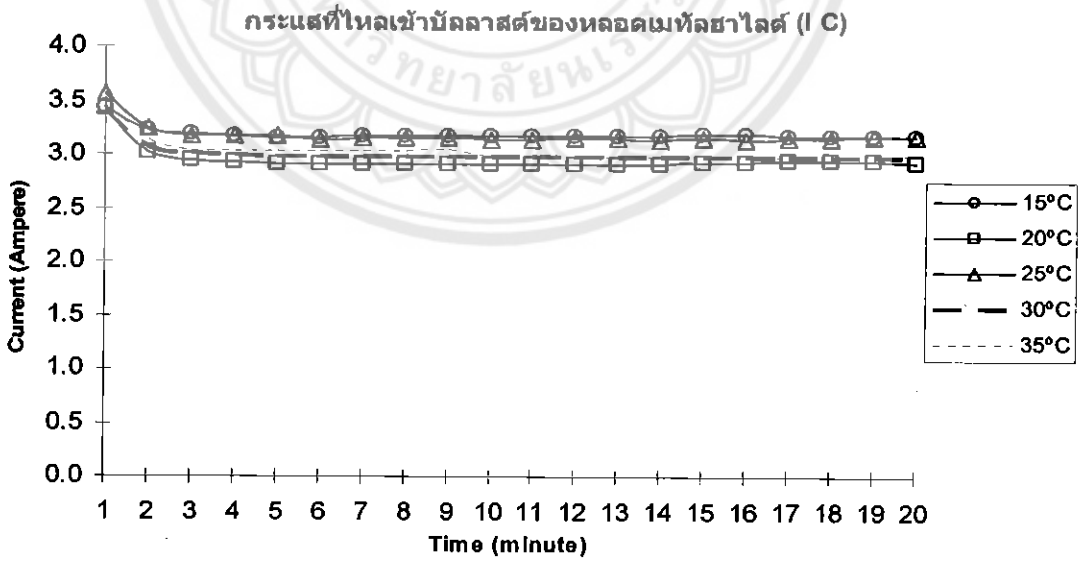
รูปที่ 4.62 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ของหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.62 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ลดลงไป ไม่มีผลกระทบต่อหน้าที่ของแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ในการจุดหลอดเมทัลฮาไลด์เลย แผนภูมิของแรงดันแต่ละอุณหภูมิก็ยังคงเป็นไปตามปกติ ส่วนแรงดันตกคร่อมบัลลาสต์ของหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 20°C นั้น เกิดจากแรงดันจ่ายเข้าสู่วงจร (V_{AC}) ที่ต่ำกว่านั่นเอง



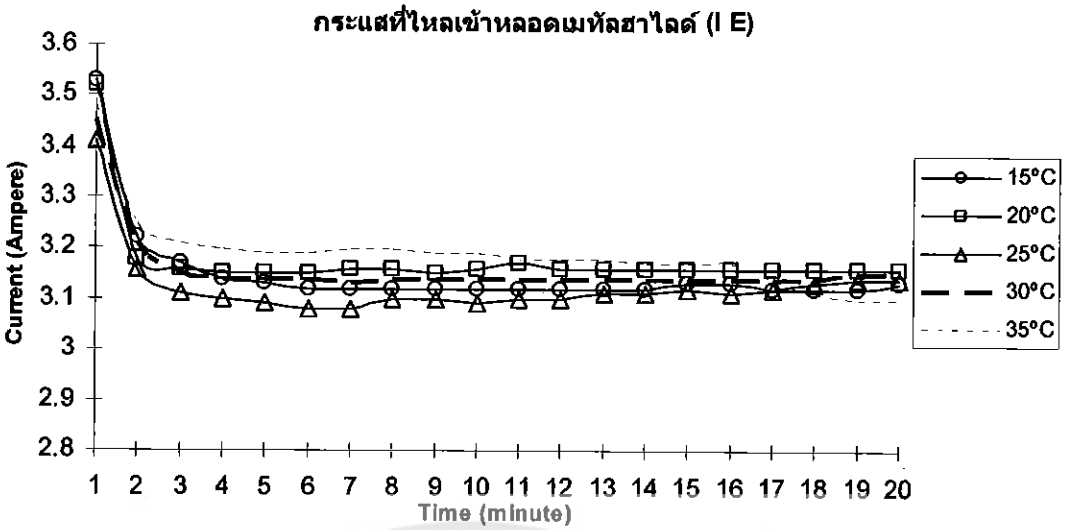
รูปที่ 4.63 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันที่ตกคร่อมหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.63 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ลดลงไป ไม่มีผลกระทบต่อหน้าที่ของแรงดัน ในการจุดหลอดเมทัลฮาไลด์เลย แผนภูมิการทำงานของแรงดันแต่ละอุณหภูมิก็ยังคงเป็นไปตามปกติ



รูปที่ 4.64 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ของหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

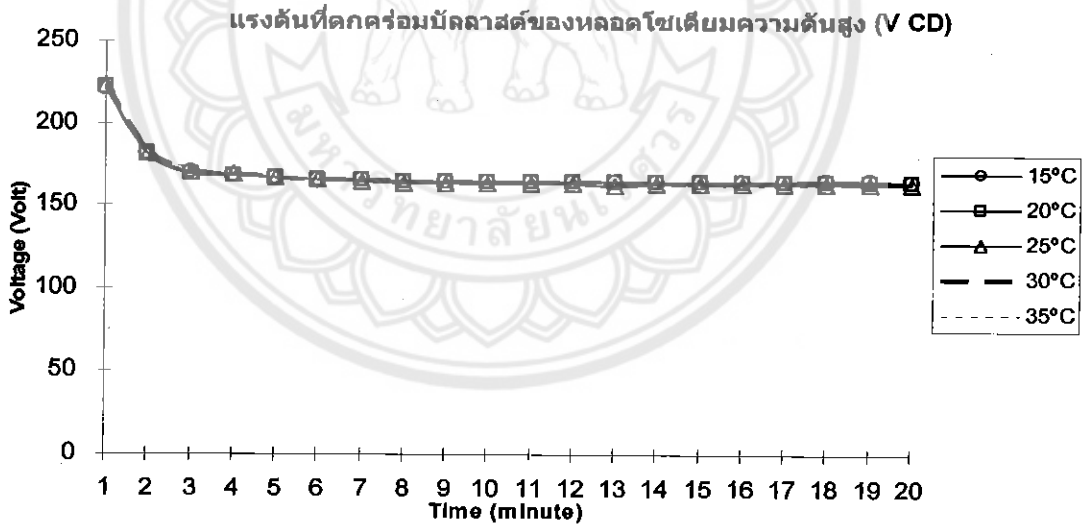
จากรูปที่ 4.64 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ลดลงไป ไม่มีผลกระทบต่อหน้าที่ของกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ ในการจุดหลอดเมทัลฮาไลด์เลย แผนภูมิของกระแสแต่ละอุณหภูมิก็ยังคงเป็นไปตามปกติ



รูปที่ 4.65 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสที่ไหลเข้าหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

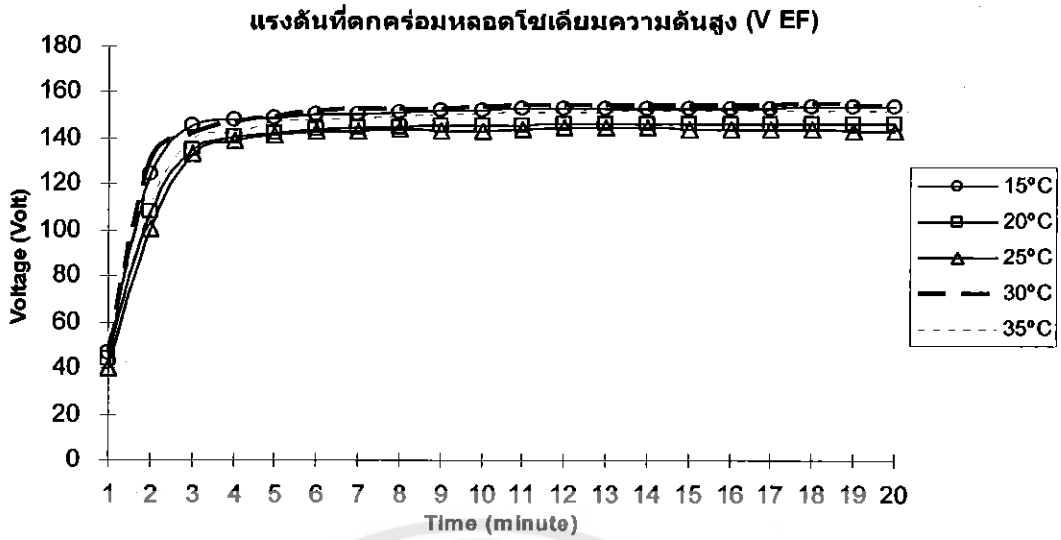
จากรูปที่ 4.65 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ลดลงไป ไม่มีผลกระทบต่อหน้าที่ของกระแส ในการจุดหลอดเมทัลฮาไลด์เลย แผนภูมิของกระแสแต่ละอุณหภูมิก็ยังคงเป็นไปตามปกติ

4.3.3 หลอดโซเดียมความดันสูง



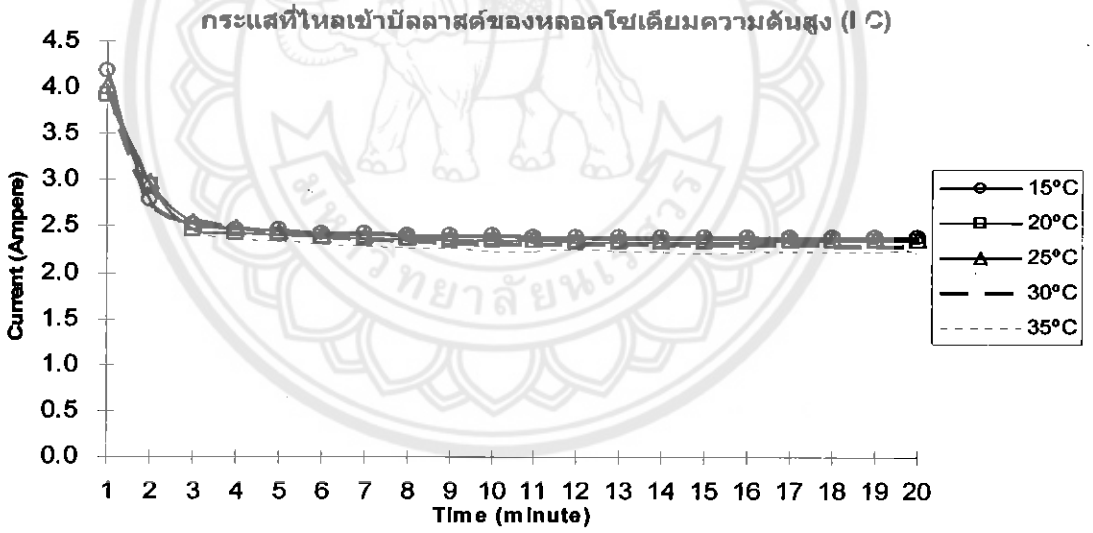
รูปที่ 4.66 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.66 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ลดลงไป ไม่มีผลกระทบต่อหน้าที่ของแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์ ในการจุดหลอดโซเดียมความดันสูงเลย แผนภูมิของแรงดันแต่ละอุณหภูมิก็ยังคงเป็นไปตามปกติ



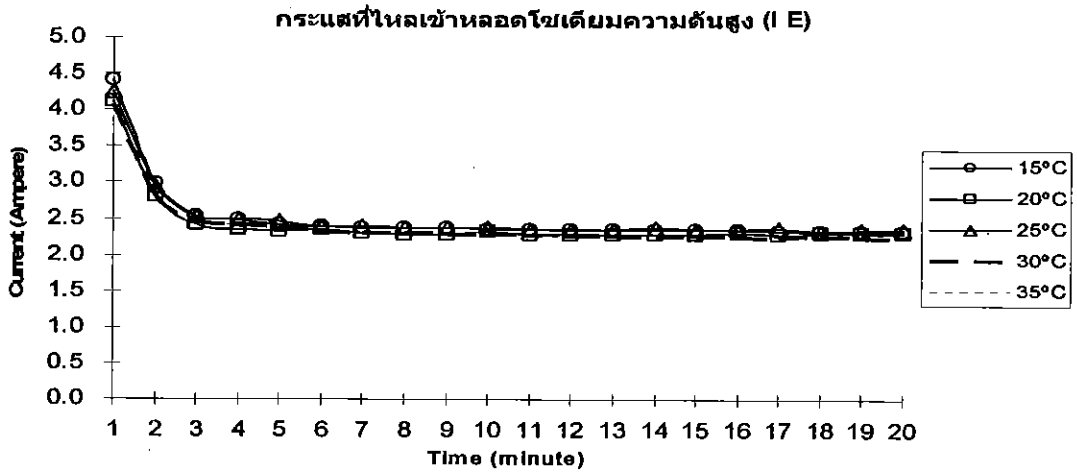
รูปที่ 4.67 แผนภูมิแสดงผลการวัดแรงดันที่ตกคร่อมหลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.67 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ลดลงไป ไม่มีผลกระทบต่อหน้าที่ของแรงดัน ในการจุดหลอดโซเดียมความดันสูงเลย แผนภูมิของแรงดันแต่ละอุณหภูมิก็ยังคงเป็นไปตามปกติ



รูปที่ 4.68 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์หลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิต่างๆ

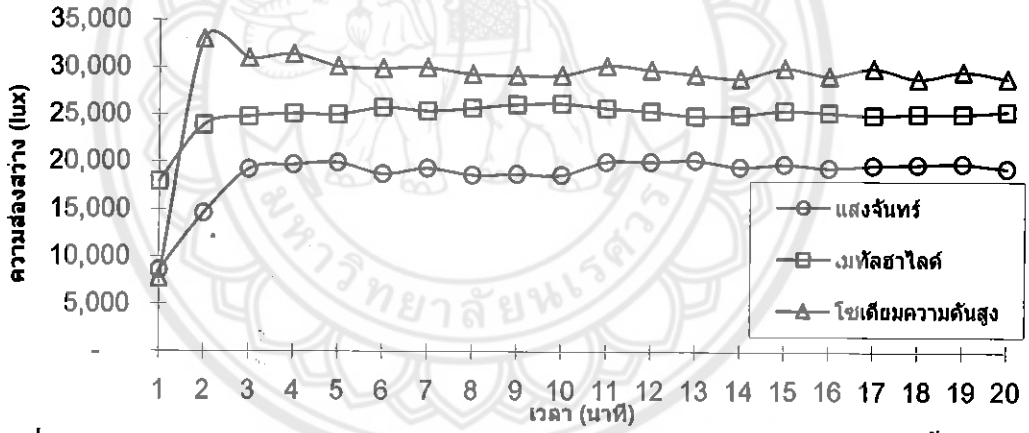
จากรูปที่ 4.68 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ลดลงไป ไม่มีผลกระทบต่อหน้าที่ของกระแสที่ไหลเข้าบัลลาสต์ ในการจุดหลอดโซเดียมความดันสูงเลย แผนภูมิของกระแสแต่ละอุณหภูมิก็ยังคงเป็นไปตามปกติ



รูปที่ 4.69 แผนภูมิแสดงผลการวัดกระแสที่ไหลเข้าหลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.69 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ลดลงไป ไม่มีผลกระทบต่อหน้าที่ของกระแส ในการจุดหลอดโซเดียมความดันสูงเลย แผนภูมิของกระแสแต่ละอุณหภูมิก็ยังคงเป็นไปตามปกติ

4.4 ผลการวัดค่าความส่องสว่าง



รูปที่ 4.70 แผนภูมิแสดงผลการวัดความส่องสว่างของหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงทั้ง 3 ชนิด

จากรูปที่จะเห็นว่า ความส่องสว่างของหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงมีค่าน้อยเมื่อเริ่มจุดหลอด จากนั้นก็เพิ่มขึ้นจนไปคงที่ที่เวลาหนึ่ง โดยความส่องสว่างของหลอดแสงจันทร์มีค่า 8,600 ลักซ์ ที่เวลา 1 นาที แล้วเพิ่มขึ้นเป็น 19,200 ลักซ์ ที่เวลา 3 นาที จากนั้นก็ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนไปคงที่ที่ 20,000 ลักซ์ ที่เวลา 11 นาที ส่วนความส่องสว่างของหลอดเมทัลฮาไลด์มีค่า 18,000 ลักซ์ ที่เวลา 1 นาที แล้วเพิ่มขึ้นเป็น 24,000 ลักซ์ ที่เวลา 2.5 นาที จากนั้นก็ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนไปคงที่ที่ 25,500 ลักซ์ ที่เวลา 15 นาที และความส่องสว่างของหลอดโซเดียมความเข้มสูงมีค่า 7,700 ลักซ์ ที่เวลา 1 นาที แล้วเพิ่มขึ้นเป็น 33,000 ลักซ์ ที่เวลา 2 นาที จากนั้นก็ค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ จนไปคงที่ที่ 30,000 ลักซ์ ที่เวลา 11 นาที โดยที่ ความส่องสว่างของหลอดโซเดียมความดันสูงจะมากกว่าความส่องสว่างของหลอดเมทัลฮาไลด์ และมากกว่าความส่องสว่างของหลอดแสงจันทร์ ตามลำดับ

บทที่ 5
วิเคราะห์และสรุปผลของโครงงาน

5.1 วิเคราะห์แรงดันและกระแส

จากข้อมูลในบทที่ 4 พบว่า ขณะที่หลอดปล่อยประจุความเข้มสูงทั้ง 3 แบบทำงานนั้น จะมีกระแสที่ไหลเข้าสู่หลอดไฟสูง ประมาณ 4 แอมแปร์ ขณะเดียวกันแรงดันตกคร่อมที่บัลลาสต์ของหลอดปล่อยประจุความเข้มสูง จะสอดคล้องกับกระแสของหลอดไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพบว่าหลอดโซเดียมความดันสูง จะมีแรงดันที่ตกคร่อมบัลลาสต์กับแรงดันที่ตกคร่อมหลอดไฟมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแตกต่างกับหลอดอีก 2 แบบ

5.2 วิเคราะห์แรงดันและกระแสที่อุณหภูมิต่างๆ

พบว่า ที่ช่วงอุณหภูมิ 15°C ถึง 35°C นี้ ไม่มีผลกระทบต่อหน้าที่การทำงานของหลอดไฟ และอุปกรณ์ภายในวงจรเลย หลอดไฟและอุปกรณ์ภายในวงจรก็ยังคงทำงานเป็นปกติ

5.3 วิเคราะห์ค่าความส่องสว่าง

ค่าความส่องสว่างของหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงมีค่าต่างกันตามชนิดของหลอดไฟ โดยที่หลอดโซเดียมความดันสูง จะมีความส่องสว่างมากที่สุด ส่วนหลอดเมทัลฮาไลด์ความส่องสว่างเมื่อเริ่มจุดหลอดกับช่วงจุดหลอดเสร็จแล้วไม่ต่างกันมากนัก และสุดท้ายหลอดแสงจันทร์ มีความส่องสว่างน้อยที่สุด

5.4 สรุปผลของโครงงาน

ในการทำโครงงานนี้ทำให้เข้าใจถึงการทำงานของหลอดไฟมากขึ้น โดยเฉพาะหลอดปล่อยประจุความเข้มสูง ทั้ง 3 ประเภทนี้ พบว่ามีคุณลักษณะการทำงานของ กระแสและแรงดัน ที่บัลลาสต์และหลอดไฟคล้ายคลึงกัน แม้ว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมจะเปลี่ยนแปลง แต่การทำงานก็ยังคงเป็นปกติ โดยที่หลอดโซเดียมความดันสูงมีความส่องสว่างมากที่สุด รองลงมาคือหลอดเมทัลฮาไลด์ และสุดท้ายหลอดแสงจันทร์มีความส่องสว่างน้อยที่สุด

5.5 ข้อเสนอแนะ

- ควรเพิ่มขนาดหลอดไฟและชนิดของบัลลาสต์ที่ใช้ในการศึกษา ให้มีขนาดที่หลากหลาย และทันสมัยมากขึ้น
- อุปกรณ์ที่ใช้วัดมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากเครื่องวัดต่างชนิดกัน จึงควรใช้เครื่องวัดชนิดเดียวกันและมี ปุ่มค้างค่า (HOLD) เพื่อที่จะได้ค่าที่แม่นยำตามช่วงเวลานั้นๆ
- เมื่อวัดกระแสพร้อมกันหลายค่า วงจรไม่ทำงาน

เอกสารอ้างอิง

[1] [http://astralighting.co.in/], สืบค้นวันที่ 20 กันยายน 2552

[2] [http://www.geocities.com/light_ting/], สืบค้นวันที่ 20 กันยายน 2552

[3] ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช. การออกแบบระบบแสงสว่าง. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2544

[4] [http://www.thaielectrics.com/], สืบค้นวันที่ 20 กันยายน 2552

[5] [http://www.rollitup.org/], สืบค้นวันที่ 20 กันยายน 2552

[6] [http://www.nationallampsandcomponents.co.uk/], สืบค้นวันที่ 20 กันยายน 2552

[7] [http://www.bikudo.com/], สืบค้นวันที่ 20 กันยายน 2552

[8] [http://www.northerntool.com/], สืบค้นวันที่ 20 กันยายน 2552

[9] [http://en.chaina.cn/], สืบค้นวันที่ 20 กันยายน 2552

[10] [http://www.ge-lightingsystems.com/], สืบค้นวันที่ 20 กันยายน 2552

[11] [http://www.drillspot.com/], สืบค้นวันที่ 20 กันยายน 2552

[12] [http://irrigation.rid.go.th/rid8/royal_coin/electrical/illumination/], สืบค้นวันที่ 20 กันยายน 2552

[13] บทเรียนบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ต. การออกแบบระบบแสงสว่าง. ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550

[14] สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย. โคมไฟโรงงานปล่อยประจุความดันไอสูง. สืบค้นจาก [http://irrigation.rid.go.th/rid8/royal_coin/electrical/illumination/luminaire.html/]

[15] ชาญศักดิ์ อภัยนิพัฒน์. เทคนิคการออกแบบระบบแสงสว่าง. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2542

[16] ดร.ชำนาญ ห่อเกียรติ. เทคนิคการส่องสว่าง. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2540

[17] ศุลี บรรจงจิตร. วิศวกรรมส่องสว่าง. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดพร้าว, 2544

[18] พิบูลย์ ดิษฐอุดม. การออกแบบระบบแสงสว่าง. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2535

[19] ดร.ณรงค์ มั่งคั่ง. วิศวกรรมส่องสว่าง. สืบค้นจาก [http://www.geocities.com/light_ting/]

[20] บริษัท แสงมิตรอิเล็กทริก จำกัด. วิศวกรรมระบบไฟฟ้าแสงสว่าง. บริษัท แสงมิตรอิเล็กทริก จำกัด, 2545

[21] Harvey Hubbell. "Hubbell Lighting". Available [http://www.hubbell-itg.com/products/browse/highbay.asp]

ภาคผนวก

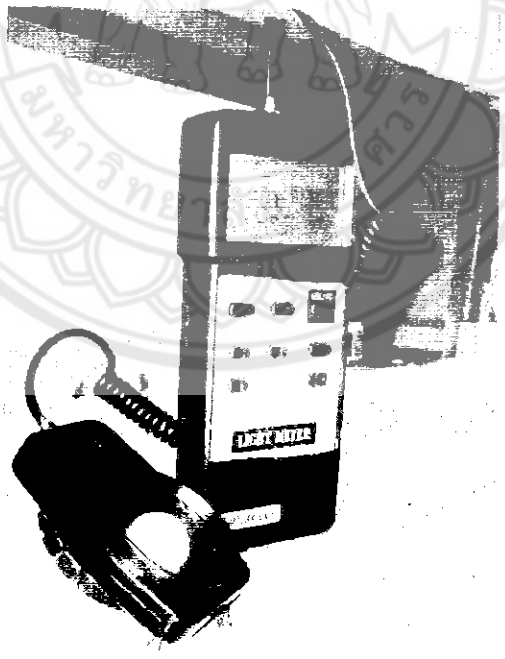
รูปที่ ผ1 หลอดแสงจันทร์

รูปที่ ผ2 หลอดเมทัลฮาไลด์

รูปที่ ผ3 หลอดโซเดียมความดันสูง

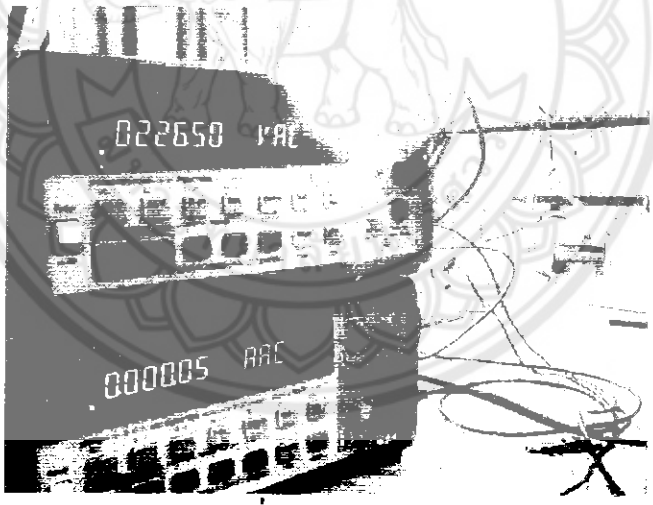
รูปที่ ผ4 บัลลาสต์สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูงหรือหลอดเมทัลฮาไลด์

รูปที่ ผ5 ตัวจุดหลอด



รูปที่ ผ6 เครื่องวัดความเข้มแสง

รูปที่ ผ8 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟาเรด



รูปที่ ผ9 มัลติมิเตอร์

ข้อมูลการบันทึกค่า

ตารางข้อมูลที่ 1 ผลการวัดแรงดันและกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)			กระแส (แอมแปร์)	
	V_{AC}	V_{AB}	V_{BC}	I_A	I_B
1	234.2	212.9	73.4	3.88	3.98
2	234.2	173.2	131.1	2.40	2.43
3	234.2	172.4	132.4	2.38	2.42
4	234.3	172.0	132.5	2.35	2.39
5	234.2	172.0	132.6	2.36	2.40
6	234.2	171.9	132.7	2.37	2.41
7	234.2	172.0	132.5	2.37	2.41
8	234.1	172.0	133.1	2.36	2.40
9	234.2	172.4	133.2	2.36	2.39
10	234.2	172.6	132.6	2.36	2.41
11	234.1	172.9	132.7	2.37	2.40
12	234.1	172.8	132.6	2.38	2.39
13	234.0	172.7	132.8	2.38	2.38
14	234.0	172.8	132.6	2.37	2.38
15	234.0	172.7	132.6	2.37	2.40
16	234.3	172.0	132.4	2.37	2.39
17	234.2	172.4	132.5	2.37	2.40
18	234.2	172.6	132.6	2.36	2.41
19	234.2	172.9	132.7	2.36	2.41
20	234.1	172.8	132.5	2.36	2.40

ตารางข้อมูลที่ 2 ผลการวัดแรงดันและกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 15°C

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)			กระแส (แอมแปร์)	
	V_{AC}	V_{AB}	V_{BC}	I_A	I_B
1	299.24	215.3	55.1	3.82	3.78
2	299.15	174.0	126.6	2.31	2.32
3	299.07	173.8	128.1	2.28	2.30
4	299.30	172.9	128.5	2.28	2.29
5	299.36	171.8	128.7	2.28	2.3
6	299.32	178.0	128.5	2.28	2.29
7	299.14	172.9	128.3	2.28	2.28
8	299.26	172.3	128.7	2.28	2.29
9	299.25	172.5	128.2	2.28	2.28
10	299.65	172.3	128.6	2.28	2.30
11	299.61	172.5	128.4	2.28	2.30
12	299.84	172.4	128.5	2.29	2.30
13	299.95	172.6	128.4	2.29	2.30
14	299.85	172.6	128.5	2.29	2.29
15	299.94	172.9	128.5	2.29	2.29
16	299.95	172.5	128.7	2.29	2.30
17	230.11	172.4	128.8	2.30	2.32
18	299.97	172.7	128.7	2.29	2.31
19	299.94	172.0	129.4	2.29	2.29
20	230.12	172.0	128.7	2.30	2.29

ตารางข้อมูลที่ 3 ผลการวัดแรงดันและกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 20°C

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)			กระแส (แอมแปร์)	
	V_{AC}	V_{AB}	V_{BC}	I_A	I_B
1	223.1	209.68	54.83	4.21	3.77
2	223.0	168.28	122.23	3.1	2.84
3	222.9	161.92	130.84	2.28	2.17
4	223.0	160.33	131.14	2.28	2.19
5	223.0	160.47	131.84	2.28	2.16
6	222.9	159.83	131.91	2.28	2.16
7	223.0	159.14	131.96	2.26	2.15
8	223.0	159.74	130.98	2.27	2.14
9	223.0	161.62	131.16	2.28	2.15
10	222.8	161.70	131.19	2.28	2.17
11	222.6	161.43	131.20	2.29	2.17
12	222.7	161.12	131.11	2.28	2.16
13	222.6	161.18	131.02	2.28	2.15
14	222.5	161.39	130.88	2.27	2.14
15	222.5	160.97	130.96	2.28	2.15
16	222.5	160.85	130.77	2.28	2.11
17	222.5	160.64	131.24	2.28	2.12
18	222.5	160.62	130.90	2.28	2.17
19	222.5	160.90	130.97	2.28	2.16
20	222.5	160.42	131.03	2.28	2.15

ตารางข้อมูลที่ 4 ผลการวัดแรงดันและกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 25°C

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)			กระแส (แอมแปร์)	
	V_{AC}	V_{AB}	V_{BC}	I_A	I_B
1	237.14	217.0	52.7	3.80	3.83
2	237.44	176.5	127.4	2.26	2.13
3	237.37	174.4	129.0	2.30	2.18
4	237.32	173.5	129.8	2.30	2.19
5	237.29	173.6	130.4	2.34	2.22
6	237.24	173.5	130.9	2.31	2.17
7	237.32	173.0	131.0	2.29	2.19
8	237.63	173.1	130.8	2.26	2.14
9	237.69	173.2	130.8	2.25	2.13
10	237.57	172.5	131.6	2.27	2.16
11	237.40	172.9	131.2	2.29	2.17
12	237.30	172.9	131.4	2.31	2.19
13	237.28	172.3	131.6	2.33	2.21
14	237.19	173.5	131.1	2.33	2.20
15	237.21	173.3	131.0	2.35	2.23
16	237.21	171.2	131.5	2.39	2.29
17	237.23	172.6	131.7	2.35	2.24
18	237.22	173.0	131.1	2.34	2.23
19	237.19	172.6	131.2	2.35	2.23
20	237.20	173.6	131.3	2.36	2.23

ตารางข้อมูลที่ 5 ผลการวัดแรงดันและกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 30°C

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)			กระแส (แอมแปร์)	
	V_{AC}	V_{AB}	V_{BC}	I_A	I_B
1	227.84	213.1	61.2	3.75	3.50
2	227.92	177.2	129.4	2.30	2.44
3	227.88	174.2	130.5	2.26	2.38
4	227.91	173.8	131.7	2.25	2.38
5	228.00	173.9	131.6	2.25	2.40
6	228.02	173.7	132.6	2.25	2.37
7	227.66	174.0	132.0	2.25	2.38
8	226.56	173.8	132.0	2.25	2.38
9	226.54	173.4	132.7	2.25	2.37
10	226.60	171.9	133.7	2.25	2.37
11	226.51	171.3	134.2	2.24	2.36
12	226.45	171.8	133.6	2.24	2.35
13	226.44	170.4	135.2	2.25	2.34
14	226.41	172.9	132.9	2.24	2.34
15	226.38	172.8	133.6	2.23	2.36
16	226.37	172.3	133.5	2.24	2.34
17	226.32	172.6	132.7	2.23	2.35
18	226.30	171.6	134.6	2.22	2.35
19	226.34	171.9	133.5	2.23	2.35
20	226.38	173.2	133.2	2.23	2.35

ตารางข้อมูลที่ 6 ผลการวัดแรงดันและกระแสของวงจรหลอดแสงจันทร์ที่ 35°C

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)			กระแส (แอมแปร์)	
	V_{AC}	V_{AB}	V_{BC}	I_A	I_B
1	230.30	212.4	66.3	3.67	3.34
2	230.25	174.0	131.5	2.31	2.30
3	230.43	173.9	132.2	2.32	2.31
4	230.60	173.8	132.6	2.31	2.31
5	230.66	173.8	132.6	2.32	2.30
6	230.75	173.5	132.8	2.32	2.30
7	230.83	173.6	132.8	2.31	2.31
8	230.98	173.2	132.8	2.30	2.30
9	231.06	173.8	133.2	2.31	2.29
10	230.92	173.3	133.4	2.31	2.30
11	230.96	173.5	133.1	2.30	2.29
12	231.02	173.6	132.4	2.31	2.31
13	231.00	173.4	132.9	2.30	2.29
14	230.82	173.2	133.7	2.31	2.30
15	230.78	172.7	133.8	2.30	2.30
16	230.82	172.6	134.0	2.30	2.29
17	230.84	172.6	133.6	2.29	2.27
18	230.72	172.3	134.5	2.29	2.28
19	230.82	172.5	133.8	2.29	2.29
20	230.72	172.9	133.8	2.29	2.28

ตารางข้อมูลที่ 7 ผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)					
	V_{AH}	V_{BD}	V_{CD}	V_{DE}	V_{DG}	V_{EF}
1	238.2	235.0	201.7	3.3	101.1	97.2
2	238.2	234.7	189.8	3.1	110.2	106.5
3	238.2	235.1	189.6	3.1	111.5	107.8
4	238.1	234.9	188.7	3.1	111.9	108.2
5	238.2	234.8	188.6	3.1	112.3	108.6
6	238.4	235.0	188.8	3.1	112.3	108.7
7	238.2	234.7	188.8	3.0	112.2	108.8
8	238.2	234.8	188.8	3.0	112.3	108.9
9	238.4	235.0	189.1	3.0	112.5	109.0
10	238.1	235.0	188.9	3.0	112.5	109.0
11	238.2	235.2	189.1	3.0	112.5	109.1
12	238.2	235.4	189.0	3.0	112.4	109.0
13	238.2	235.5	189.4	3.0	112.5	109.1
14	238.1	235.5	189.1	3.0	112.5	109.2
15	238.2	235.5	189.2	3.0	112.6	109.2
16	238.1	235.4	189.2	2.9	112.5	109.2
17	238.2	235.4	189.5	2.9	112.6	109.3
18	238.2	235.4	189.5	2.8	112.6	109.2
19	238.2	235.4	189.6	2.9	112.8	109.3
20	238.2	235.4	189.6	2.9	112.8	109.3

ตารางข้อมูลที่ 8 ผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์

เวลา (นาที)	กระแส (แอมแปร์)				
	I_A	I_B	I_C	I_D	I_E
1	2.17	1.50	4.02	4.01	3.86
2	1.92	1.50	3.93	3.91	3.85
3	1.89	1.50	3.87	3.88	3.83
4	1.86	1.50	3.88	3.87	3.81
5	1.86	1.50	3.87	3.86	3.80
6	1.85	1.51	3.87	3.86	3.80
7	1.86	1.51	3.87	3.86	3.80
8	1.86	1.51	3.88	3.86	3.80
9	1.85	1.50	3.88	3.86	3.81
10	1.86	1.50	3.88	3.85	3.81
11	1.87	1.50	3.89	3.85	3.82
12	1.86	1.50	3.89	3.85	3.82
13	1.86	1.50	3.87	3.85	3.81
14	1.87	1.50	3.88	3.84	3.81
15	1.87	1.50	3.87	3.84	3.81
16	1.87	1.51	3.88	3.83	3.81
17	1.86	1.50	3.88	3.84	3.82
18	1.86	1.50	3.87	3.83	3.81
19	1.86	1.51	3.87	3.83	3.81
20	1.86	1.50	3.87	3.83	3.81

ตารางข้อมูลที่ 9 ผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 15°C

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)					
	V_{AH}	V_{BD}	V_{CD}	V_{DE}	V_{DG}	V_{EF}
1	236.3	234.42	204.42	1.95	82.86	86.96
2	236.3	234.51	195.76	1.85	101.25	99.83
3	236.4	234.58	192.86	1.81	104.08	102.55
4	236.4	234.62	192.51	1.79	106.07	103.92
5	236.3	234.65	192.82	1.79	106.58	104.56
6	236.3	234.84	192.20	1.78	106.72	104.71
7	236.2	235.05	191.87	1.77	106.72	104.87
8	236.3	234.22	192.07	1.76	106.65	104.97
9	236.4	234.46	192.24	1.76	106.65	105.00
10	236.4	234.54	191.94	1.76	106.68	105.03
11	236.4	234.69	191.95	1.75	106.77	105.08
12	236.4	234.85	191.70	1.75	106.75	105.10
13	236.4	235.21	191.57	1.74	106.81	105.15
14	236.4	235.33	191.41	1.74	106.88	105.16
15	236.4	235.56	191.17	1.73	106.90	105.18
16	236.6	235.71	190.71	1.73	106.95	105.20
17	236.7	235.85	190.30	1.72	106.96	105.17
18	236.7	235.73	190.17	1.72	106.93	105.08
19	236.7	235.65	189.55	1.72	107.16	105.07
20	236.6	235.54	189.45	1.71	107.18	105.13

ตารางข้อมูลที่ 10 ผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 15°C

เวลา (นาที)	กระแส (แอมแปร์)				
	I_A	I_B	I_C	I_D	I_E
1	2.21	1.48	3.43	3.4	3.53
2	2.02	1.48	3.23	3.24	3.22
3	1.99	1.49	3.19	3.22	3.17
4	1.98	1.47	3.17	3.18	3.14
5	1.96	1.48	3.16	3.17	3.13
6	1.97	1.48	3.16	3.18	3.12
7	1.97	1.47	3.17	3.16	3.12
8	1.98	1.48	3.17	3.15	3.12
9	1.98	1.48	3.17	3.14	3.12
10	1.98	1.48	3.18	3.15	3.12
11	1.99	1.47	3.18	3.16	3.12
12	1.98	1.47	3.18	3.16	3.12
13	1.98	1.48	3.18	3.16	3.12
14	1.97	1.46	3.18	3.15	3.12
15	1.97	1.48	3.19	3.16	3.13
16	1.97	1.48	3.19	3.16	3.13
17	1.96	1.48	3.18	3.16	3.12
18	1.97	1.48	3.18	3.16	3.12
19	1.96	1.48	3.18	3.16	3.12
20	1.96	1.48	3.18	3.16	3.13

ตารางข้อมูลที่ 11 ผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 20°C

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)					
	V_{AH}	V_{BD}	V_{CD}	V_{DE}	V_{DG}	V_{EF}
1	224.7	223.3	204.65	1.80	85.47	82.23
2	225.1	223.3	190.86	1.72	102.37	98.50
3	225.2	223.3	187.21	1.69	105.46	102.93
4	225.1	223.5	186.52	1.67	106.41	103.83
5	225.1	223.3	186.20	1.66	106.71	104.09
6	225.2	223.3	185.83	1.64	106.84	104.72
7	225.1	223.4	185.93	1.61	106.87	104.47
8	225.0	223.3	185.61	1.61	106.91	104.93
9	225.1	223.2	186.33	1.60	106.91	104.98
10	225.1	223.2	186.24	1.59	106.98	105.17
11	225.0	223.8	186.22	1.58	107.08	105.16
12	225.0	223.7	186.46	1.57	107.04	104.86
13	224.9	223.7	186.40	1.57	107.34	104.88
14	225.0	223.7	186.41	1.57	107.10	105.10
15	225.0	223.6	186.34	1.57	107.15	105.16
16	225.0	223.5	186.33	1.57	107.18	105.12
17	225.0	223.5	186.25	1.57	107.13	105.13
18	225.1	223.5	186.55	1.56	107.14	105.07
19	225.0	223.5	186.40	1.56	107.16	105.07
20	225.0	223.5	186.24	1.56	107.20	105.10

ตารางข้อมูลที่ 12 ผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 20°C

เวลา (นาที)	กระแส (แอมแปร์)				
	I_A	I_B	I_C	I_D	I_E
1	2.04	1.49	3.42	3.54	3.52
2	1.89	1.48	3.02	3.22	3.18
3	1.86	1.48	2.95	3.20	3.16
4	1.84	1.49	2.93	3.18	3.15
5	1.84	1.48	2.92	3.19	3.15
6	1.83	1.48	2.92	3.18	3.15
7	1.84	1.50	2.92	3.19	3.16
8	1.83	1.48	2.91	3.18	3.16
9	1.84	1.49	2.92	3.18	3.15
10	1.84	1.48	2.92	3.19	3.16
11	1.83	1.48	2.92	3.20	3.17
12	1.82	1.49	2.92	3.19	3.16
13	1.84	1.48	2.92	3.18	3.16
14	1.82	1.48	2.92	3.18	3.16
15	1.82	1.48	2.93	3.19	3.16
16	1.83	1.48	2.93	3.19	3.16
17	1.82	1.49	2.94	3.18	3.16
18	1.81	1.48	2.94	3.18	3.16
19	1.82	1.48	2.94	3.19	3.16
20	1.81	1.48	2.93	3.19	3.16

ตารางข้อมูลที่ 13 ผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 25°C

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)					
	V_{AH}	V_{BD}	V_{CD}	V_{DE}	V_{DG}	V_{EF}
1	227.11	226.1	204.69	1.82	88.54	85.67
2	227.91	226.2	193.95	1.61	100.15	101.33
3	227.88	226.2	191.96	1.58	103.24	102.36
4	227.35	226.3	191.64	1.57	104.77	103.43
5	227.32	226.4	191.40	1.56	105.08	103.77
6	227.24	226.4	191.30	1.55	105.22	103.86
7	228.30	226.5	190.87	1.55	105.37	104.02
8	228.34	226.4	189.95	1.56	105.47	104.09
9	228.22	226.2	189.19	1.58	105.43	104.13
10	228.05	226.5	190.22	1.57	105.44	104.11
11	228.07	226.7	189.64	1.57	105.49	104.01
12	228.05	226.4	189.86	1.56	105.63	104.02
13	228.04	226.2	190.23	1.57	105.68	103.93
14	228.06	226.3	189.95	1.56	105.70	103.77
15	228.04	226.3	190.57	1.57	105.80	103.74
16	227.95	226.3	190.18	1.57	105.8	103.74
17	227.89	226.4	190.42	1.58	105.79	103.76
18	227.93	226.6	190.52	1.58	105.90	103.75
19	227.90	226.3	190.28	1.58	105.91	103.76
20	227.87	226.1	190.26	1.57	105.92	103.76

ตารางข้อมูลที่ 14 ผลการวัดกระแสของวงจรหลอดแมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 25°C

เวลา (นาที)	กระแส (แอมแปร์)				
	I_A	I_B	I_C	I_D	I_E
1	2.23	1.48	3.57	3.42	3.41
2	1.90	1.48	3.24	3.17	3.16
3	1.88	1.50	3.18	3.12	3.11
4	1.87	1.48	3.18	3.11	3.10
5	1.86	1.49	3.18	3.11	3.09
6	1.86	1.48	3.14	3.10	3.08
7	1.88	1.49	3.16	3.11	3.08
8	1.87	1.48	3.15	3.08	3.10
9	1.86	1.49	3.16	3.06	3.10
10	1.86	1.49	3.14	3.08	3.09
11	1.88	1.49	3.14	3.07	3.10
12	1.87	1.49	3.15	3.07	3.10
13	1.87	1.49	3.16	3.08	3.11
14	1.87	1.50	3.14	3.07	3.11
15	1.86	1.48	3.16	3.08	3.12
16	1.86	1.49	3.14	3.08	3.11
17	1.86	1.50	3.16	3.08	3.12
18	1.86	1.49	3.15	3.09	3.13
19	1.86	1.50	3.17	3.08	3.14
20	1.86	1.50	3.17	3.08	3.14

ตารางข้อมูลที่ 15 ผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 30°C

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)					
	V_{AH}	V_{BD}	V_{CD}	V_{DE}	V_{DG}	V_{EF}
1	234.2	232.8	204.37	1.68	84.48	78.40
2	234.2	232.8	193.20	1.58	101.85	96.24
3	234.2	232.7	190.79	1.55	105.30	101.08
4	234.3	232.6	190.50	1.54	106.64	102.11
5	234.2	232.7	190.28	1.52	106.91	103.14
6	234.2	232.8	190.36	1.51	107.18	103.62
7	234.2	232.7	190.11	1.51	107.20	103.77
8	234.1	232.8	190.24	1.50	107.27	103.95
9	234.2	232.6	190.31	1.50	107.35	103.98
10	234.2	232.5	190.47	1.49	107.42	104.10
11	234.1	232.6	190.92	1.48	107.51	104.07
12	234.1	232.7	190.54	1.47	107.65	104.12
13	234.0	232.7	190.85	1.47	107.63	104.07
14	234.0	232.7	190.82	1.46	107.62	104.01
15	234.0	232.6	191.21	1.46	107.74	104.02
16	234.1	232.6	190.77	1.45	107.76	104.00
17	234.2	232.5	190.55	1.44	107.77	104.33
18	234.2	232.6	190.30	1.44	107.93	104.34
19	234.1	232.6	191.24	1.44	107.96	104.31
20	234.0	232.7	191.41	1.43	108.03	104.28

ตารางข้อมูลที่ 16 ผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 30°C

เวลา (นาที)	กระแส (แอมแปร์)				
	I_A	I_B	I_C	I_D	I_E
1	2.15	1.50	3.38	3.47	3.45
2	1.93	1.48	3.07	3.23	3.21
3	1.90	1.48	3.01	3.18	3.15
4	1.88	1.49	3.00	3.17	3.14
5	1.86	1.48	2.99	3.18	3.14
6	1.88	1.48	2.98	3.18	3.14
7	1.87	1.48	2.98	3.18	3.13
8	1.88	1.49	2.98	3.18	3.14
9	1.87	1.48	2.98	3.18	3.14
10	1.88	1.48	2.98	3.18	3.14
11	1.86	1.49	2.98	3.20	3.14
12	1.87	1.49	2.99	3.18	3.14
13	1.87	1.48	2.98	3.18	3.14
14	1.88	1.49	2.98	3.19	3.14
15	1.87	1.48	2.98	3.19	3.14
16	1.87	1.48	2.98	3.18	3.14
17	1.87	1.48	2.98	3.18	3.14
18	1.87	1.48	2.99	3.18	3.14
19	1.88	1.48	2.99	3.18	3.15
20	1.87	1.48	2.99	3.19	3.15

ตารางข้อมูลที่ 17 ผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 35°C

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)					
	V_{AH}	V_{BD}	V_{CD}	V_{DE}	V_{DG}	V_{EF}
1	236.6	235.83	202.81	1.63	91.2	82.63
2	236.7	235.69	194.13	1.54	103.72	101.36
3	236.7	235.61	191.56	1.50	106.32	104.27
4	236.7	235.58	190.85	1.49	107.14	104.61
5	236.7	235.69	190.80	1.48	107.52	104.44
6	236.7	235.77	190.50	1.46	107.68	104.83
7	236.7	235.72	190.24	1.45	107.79	104.74
8	236.7	235.65	190.48	1.45	107.89	104.47
9	236.7	235.73	190.53	1.44	107.86	104.33
10	236.7	235.85	190.30	1.43	107.91	104.26
11	236.9	235.61	190.49	1.42	107.76	104.14
12	236.9	235.36	190.40	1.41	107.78	104.22
13	236.8	235.12	190.62	1.41	107.83	104.25
14	236.7	235.34	189.90	1.39	107.93	104.32
15	236.7	235.56	189.92	1.38	107.90	104.44
16	236.7	235.77	190.10	1.37	107.94	104.43
17	235.3	234.93	189.95	1.37	107.86	104.45
18	234.1	234.74	190.14	1.36	107.51	104.46
19	233.9	234.72	189.90	1.36	107.45	104.45
20	233.7	234.78	190.00	1.35	107.38	104.45

ตารางข้อมูลที่ 18 ผลการวัดกระแสของวงจรหลอดเมทัลฮาไลด์ที่อุณหภูมิ 35°C

เวลา (นาที)	กระแส (แอมแปร์)				
	I_A	I_B	I_C	I_D	I_E
1	2.21	1.48	3.47	3.49	3.48
2	1.92	1.49	3.14	3.29	3.25
3	1.90	1.48	3.04	3.25	3.21
4	1.92	1.50	3.04	3.23	3.20
5	1.88	1.48	3.04	3.23	3.19
6	1.89	1.48	3.04	3.24	3.19
7	1.91	1.48	3.03	3.24	3.20
8	1.89	1.50	3.04	3.23	3.20
9	1.89	1.49	3.05	3.23	3.19
10	1.88	1.48	2.99	3.23	3.19
11	1.87	1.48	2.98	3.21	3.18
12	1.87	1.49	2.98	3.21	3.18
13	1.86	1.48	2.99	3.21	3.18
14	1.86	1.48	2.99	3.20	3.17
15	1.85	1.49	2.99	3.20	3.17
16	1.86	1.48	2.99	3.20	3.17
17	1.85	1.48	2.99	3.16	3.14
18	1.84	1.50	2.98	3.15	3.11
19	1.84	1.48	3.00	3.13	3.10
20	1.86	1.49	3.00	3.14	3.10

ตารางข้อมูลที่ 19 ผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูง

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)					
	V_{AH}	V_{BD}	V_{CD}	V_{DE}	V_{DG}	V_{EF}
1	237.20	235.3	221.2	1.72	53.22	50.36
2	237.24	235.2	183.5	1.31	133.57	128.29
3	237.33	235.8	170.2	1.22	150.74	148.67
4	237.26	235.6	166.8	1.20	153.25	150.72
5	237.37	235.8	165.1	1.20	155.61	153.71
6	237.33	236.1	164.2	1.21	158.46	155.08
7	237.24	235.8	162.9	1.20	159.15	155.9
8	237.32	235.8	162.5	1.20	159.19	156.62
9	237.27	236	162.6	1.20	159.26	156.92
10	237.29	235.9	162.0	1.20	159.32	157.25
11	237.32	236.1	162.0	1.20	159.57	157.44
12	237.24	236	161.8	1.20	159.84	158.61
13	237.35	235.8	161.5	1.20	159.91	157.71
14	237.33	236.1	161.7	1.20	159.94	158.02
15	237.33	236.3	161.7	1.20	160.03	158.09
16	237.24	236.30	161.50	1.19	159.96	158.11
17	237.35	236.20	161.30	1.19	159.83	158.15
18	237.56	236.40	161.30	1.18	160.01	158.23
19	237.14	236.40	161.20	1.19	159.74	158.31
20	237.63	236.30	161.10	1.19	159.43	159.35

ตารางข้อมูลที่ 20 ผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูง

เวลา (นาที)	กระแส (แอมแปร์)				
	I_A	I_B	I_C	I_D	I_E
1	2.87	1.47	4.26	4.21	4.25
2	1.78	1.47	2.85	2.78	2.74
3	1.51	1.47	2.47	2.49	2.46
4	1.45	1.47	2.39	2.42	2.38
5	1.43	1.47	2.35	2.37	2.35
6	1.41	1.47	2.31	2.34	2.31
7	1.39	1.47	2.29	2.31	2.29
8	1.38	1.46	2.28	2.29	2.28
9	1.38	1.46	2.27	2.28	2.27
10	1.37	1.46	2.26	2.27	2.26
11	1.38	1.46	2.25	2.26	2.26
12	1.36	1.46	2.25	2.25	2.26
13	1.37	1.46	2.25	2.25	2.25
14	1.36	1.46	2.24	2.24	2.25
15	1.36	1.47	2.24	2.24	2.25
16	1.36	1.46	2.24	2.24	2.24
17	1.36	1.45	2.24	2.24	2.24
18	1.36	1.46	2.23	2.23	2.24
19	1.35	1.46	2.23	2.23	2.23
20	1.35	1.47	2.23	2.23	2.23

ตารางข้อมูลที่ 21 ผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 15°C

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)					
	V_{AH}	V_{BD}	V_{CD}	V_{DE}	V_{DG}	V_{EF}
1	236.3	235.42	204.42	1.95	82.86	86.96
2	236.3	235.51	195.76	1.85	101.25	99.83
3	236.4	235.58	192.86	1.81	104.08	102.55
4	236.4	235.62	192.51	1.79	106.07	103.92
5	236.3	235.65	192.82	1.79	106.58	104.56
6	236.3	235.84	192.20	1.78	106.72	104.71
7	236.2	235.05	191.87	1.77	106.72	104.87
8	236.3	235.22	192.07	1.76	106.65	104.97
9	236.4	235.46	192.24	1.76	106.65	105.00
10	236.4	235.54	191.94	1.76	106.68	105.03
11	236.4	235.69	191.95	1.75	106.77	105.08
12	236.4	235.85	191.70	1.75	106.75	105.10
13	236.4	236.21	191.57	1.74	106.81	105.15
14	236.4	235.33	191.41	1.74	106.88	105.16
15	236.4	235.56	191.17	1.73	106.90	105.18
16	236.6	235.71	190.71	1.73	106.95	105.20
17	236.7	235.85	190.30	1.72	106.96	105.17
18	236.7	235.73	190.17	1.72	106.93	105.08
19	236.7	235.65	189.55	1.72	107.16	105.07
20	236.6	235.54	189.45	1.71	107.18	105.13

ตารางข้อมูลที่ 22 ผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 15°C

เวลา (นาที)	กระแส (แอมแปร์)				
	I_A	I_B	I_C	I_D	I_E
1	2.21	1.48	3.43	3.4	3.53
2	2.02	1.48	3.23	3.24	3.22
3	1.99	1.49	3.19	3.22	3.17
4	1.98	1.47	3.17	3.18	3.14
5	1.96	1.48	3.16	3.17	3.13
6	1.97	1.48	3.16	3.18	3.12
7	1.97	1.47	3.17	3.16	3.12
8	1.98	1.48	3.17	3.15	3.12
9	1.98	1.48	3.17	3.14	3.12
10	1.98	1.48	3.18	3.15	3.12
11	1.99	1.47	3.18	3.16	3.12
12	1.98	1.47	3.18	3.16	3.12
13	1.98	1.48	3.18	3.16	3.12
14	1.97	1.46	3.18	3.15	3.12
15	1.97	1.48	3.19	3.16	3.13
16	1.97	1.48	3.19	3.16	3.13
17	1.96	1.48	3.18	3.16	3.12
18	1.97	1.48	3.18	3.16	3.12
19	1.96	1.48	3.18	3.16	3.12
20	1.96	1.48	3.18	3.16	3.13

ตารางข้อมูลที่ 23 ผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 20°C

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)					
	V_{AH}	V_{BD}	V_{CD}	V_{DE}	V_{DG}	V_{EF}
1	237.03	236.7	221.42	2.23	46.87	44.42
2	237.10	236.5	181.27	1.45	122.90	107.69
3	237.15	236.5	169.39	1.36	146.36	135.08
4	237.16	236.6	168.57	1.35	150.25	140.48
5	237.11	236.6	166.75	1.34	152.10	142.36
6	237.06	236.6	165.94	1.33	152.80	143.76
7	237.13	236.6	165.36	1.33	154.42	144.83
8	237.20	236.5	165.00	1.33	154.10	145.00
9	237.15	236.5	164.50	1.33	155.32	145.44
10	237.04	236.5	164.45	1.32	155.45	145.28
11	237.07	236.6	164.56	1.32	156.18	145.36
12	237.15	236.8	164.80	1.32	156.16	146.77
13	237.13	236.8	164.34	1.32	156.64	146.81
14	237.09	236.7	164.36	1.32	156.48	146.69
15	237.10	236.6	164.53	1.32	156.13	146.74
16	237.16	236.8	164.46	1.32	156.25	146.64
17	237.13	236.6	164.66	1.32	156.60	146.30
18	237.07	236.7	164.44	1.32	155.98	146.38
19	237.22	236.7	164.57	1.32	155.95	146.46
20	237.02	236.7	164.25	1.32	155.67	146.61

ตารางข้อมูลที่ 24 ผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 20°C

เวลา (นาที)	กระแส (แอมแปร์)				
	I_A	I_B	I_C	I_D	I_E
1	2.56	1.48	3.92	4.13	4.11
2	1.77	1.48	2.94	2.79	2.81
3	1.52	1.48	2.47	2.45	2.43
4	1.50	1.49	2.43	2.37	2.35
5	1.48	1.48	2.41	2.36	2.34
6	1.46	1.48	2.38	2.36	2.35
7	1.45	1.48	2.36	2.31	2.30
8	1.44	1.50	2.36	2.29	2.28
9	1.46	1.48	2.35	2.30	2.29
10	1.47	1.48	2.35	2.33	2.32
11	1.48	1.48	2.35	2.29	2.28
12	1.45	1.49	2.33	2.30	2.29
13	1.44	1.48	2.33	2.29	2.29
14	1.45	1.49	2.33	2.30	2.29
15	1.45	1.48	2.33	2.31	2.29
16	1.44	1.48	2.33	2.30	2.30
17	1.44	1.48	2.34	2.30	2.29
18	1.45	1.49	2.34	2.31	2.30
19	1.46	1.48	2.34	2.30	2.30
20	1.46	1.49	2.34	2.30	2.30

ตารางข้อมูลที่ 25 ผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 25°C

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)					
	V_{AH}	V_{BD}	V_{CD}	V_{DE}	V_{DG}	V_{EF}
1	237.10	236.8	222.54	2.2	48.67	39.71
2	237.16	236.7	181.46	1.44	122.38	100.70
3	237.04	236.8	170.82	1.35	146.85	132.96
4	237.16	237.0	169.44	1.33	150.41	139.08
5	237.12	236.8	167.35	1.31	152.03	141.21
6	237.07	236.6	166.41	1.30	153.55	142.78
7	237.13	236.7	165.23	1.28	154.36	143.15
8	237.16	237.0	164.21	1.28	155.26	143.80
9	237.22	236.9	164.00	1.27	155.34	143.42
10	237.04	236.7	163.82	1.26	155.78	143.39
11	237.06	236.8	163.32	1.25	155.98	144.03
12	237.15	236.6	163.12	1.25	156.00	144.47
13	237.09	237.0	162.88	1.24	156.36	144.68
14	237.11	236.7	163.92	1.24	155.91	144.64
15	237.10	236.8	163.89	1.23	156.22	144.07
16	237.08	236.6	163.71	1.23	156.35	144.23
17	237.03	236.8	163.82	1.22	156.30	143.94
18	237.10	237.0	163.81	1.22	156.42	144.02
19	237.08	236.8	163.68	1.21	156.76	143.42
20	237.07	236.7	163.86	1.21	156.53	143.30

ตารางข้อมูลที่ 26 ผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 25°C

เวลา (นาที)	กระแส (แอมแปร์)				
	I_A	I_B	I_C	I_D	I_E
1	2.65	1.46	4.22	4.25	4.25
2	1.85	1.48	2.98	2.91	2.95
3	1.60	1.48	2.55	2.52	2.54
4	1.56	1.49	2.48	2.46	2.48
5	1.54	1.48	2.44	2.42	2.47
6	1.53	1.46	2.41	2.39	2.40
7	1.50	1.48	2.41	2.38	2.40
8	1.50	1.49	2.38	2.38	2.38
9	1.50	1.48	2.39	2.36	2.38
10	1.50	1.48	2.39	2.37	2.38
11	1.49	1.49	2.37	2.36	2.36
12	1.48	1.48	2.36	2.35	2.35
13	1.48	1.49	2.37	2.35	2.35
14	1.47	1.50	2.36	2.34	2.37
15	1.48	1.47	2.37	2.33	2.36
16	1.47	1.49	2.36	2.35	2.36
17	1.46	1.50	2.37	2.34	2.37
18	1.47	1.48	2.37	2.34	2.34
19	1.46	1.48	2.36	2.34	2.35
20	1.47	1.48	2.36	2.34	2.36

ตารางข้อมูลที่ 27 ผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 30°C

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)					
	V_{AH}	V_{BD}	V_{CD}	V_{DE}	V_{DG}	V_{EF}
1	237.15	236.83	222.61	1.92	56.64	47.57
2	237.07	236.69	183.43	1.32	125.07	130.68
3	237.16	236.61	171.80	1.24	148.52	142.46
4	237.03	236.58	169.09	1.23	153.04	146.96
5	237.10	236.69	167.36	1.22	155.08	149.92
6	237.13	236.77	166.38	1.21	156.96	151.83
7	237.16	236.72	165.91	1.20	157.54	152.69
8	237.04	236.65	165.25	1.20	158.25	152.79
9	237.11	236.73	164.80	1.19	158.94	153.29
10	237.13	236.85	164.42	1.19	159.72	154.00
11	237.08	236.61	164.84	1.18	160.30	154.41
12	237.03	236.36	164.55	1.18	160.72	154.70
13	237.11	236.12	164.25	1.18	161.14	154.72
14	237.12	236.34	164.32	1.18	160.42	154.90
15	237.02	236.56	164.20	1.17	160.30	154.97
16	237.15	236.77	164.26	1.17	160.21	154.95
17	237.08	236.93	164.60	1.17	159.97	155.00
18	237.11	236.74	164.43	1.16	159.92	155.05
19	237.03	236.72	164.30	1.16	159.88	154.98
20	237.07	236.78	164.42	1.16	159.62	154.93

ตารางข้อมูลที่ 28 ผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 30°C

เวลา (นาที)	กระแส (แอมแปร์)				
	I_A	I_B	I_C	I_D	I_E
1	2.84	1.48	3.98	4.12	4.07
2	1.71	1.49	2.75	2.91	2.80
3	1.60	1.48	2.56	2.50	2.47
4	1.57	1.48	2.48	2.43	2.41
5	1.50	1.49	2.43	2.39	2.37
6	1.48	1.48	2.38	2.34	2.32
7	1.46	1.48	2.36	2.32	2.31
8	1.45	1.48	2.35	2.32	2.30
9	1.45	1.49	2.33	2.30	2.29
10	1.42	1.48	2.31	2.30	2.28
11	1.42	1.48	2.31	2.30	2.28
12	1.42	1.48	2.30	2.29	2.27
13	1.43	1.49	2.30	2.28	2.26
14	1.42	1.48	2.30	2.28	2.26
15	1.41	1.49	2.30	2.28	2.26
16	1.40	1.50	2.30	2.28	2.26
17	1.41	1.48	2.30	2.27	2.25
18	1.43	1.48	2.99	2.28	2.26
19	1.42	1.49	2.98	2.28	2.25
20	1.42	1.48	2.99	2.27	2.25

ตารางข้อมูลที่ 29 ผลการวัดแรงดันของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 35°C

เวลา (นาที)	แรงดัน (โวลต์)					
	V_{AH}	V_{BD}	V_{CD}	V_{DE}	V_{DG}	V_{EF}
1	237.03	235.8	221.42	1.53	49.79	45.75
2	237.09	235.8	183.81	1.29	122.58	110.90
3	237.11	235.7	171.96	1.22	147.52	139.84
4	237.08	235.6	169.70	1.21	151.38	142.36
5	237.03	235.8	167.08	1.19	153.30	146.91
6	237.06	235.6	165.96	1.19	154.58	147.85
7	237.17	235.7	165.40	1.18	155.86	148.72
8	237.03	235.5	164.36	1.17	156.5	149.94
9	237.11	235.5	164.15	1.17	157.25	150.27
10	237.10	235.6	163.48	1.16	157.70	150.86
11	237.13	235.6	163.28	1.16	158.26	151.21
12	237.06	235.7	163.31	1.16	158.52	150.96
13	237.07	235.7	163.19	1.15	158.51	151.32
14	237.04	235.7	162.72	1.15	158.70	152.20
15	237.15	235.6	162.78	1.15	158.82	152.43
16	237.11	235.6	162.93	1.14	158.84	152.23
17	237.15	235.5	162.90	1.14	158.92	152.33
18	237.15	235.5	162.69	1.14	159.00	152.40
19	237.10	235.5	162.83	1.14	159.06	152.36
20	237.11	235.6	163.12	1.13	159.24	152.27

ตารางข้อมูลที่ 30 ผลการวัดกระแสของวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงที่อุณหภูมิ 35°C

เวลา (นาที)	กระแส (แอมแปร์)				
	I_A	I_B	I_C	I_D	I_E
1	2.58	1.51	3.94	4.21	4.24
2	1.80	1.49	2.88	2.87	2.87
3	1.58	1.48	2.45	2.53	2.49
4	1.50	1.48	2.37	2.47	2.43
5	1.47	1.48	2.34	2.40	2.39
6	1.44	1.48	2.30	2.37	2.36
7	1.43	1.49	2.29	2.35	2.33
8	1.42	1.48	2.27	2.35	2.33
9	1.42	1.48	2.26	2.32	2.31
10	1.40	1.49	2.23	2.33	2.30
11	1.38	1.48	2.23	2.31	2.29
12	1.40	1.48	2.25	2.31	2.29
13	1.40	1.49	2.24	2.30	2.29
14	1.39	1.5	2.23	2.30	2.29
15	1.39	1.48	2.22	2.29	2.29
16	1.40	1.49	2.23	2.30	2.29
17	1.39	1.48	2.23	2.30	2.29
18	1.40	1.48	2.23	2.31	2.29
19	1.40	1.49	2.24	2.30	2.29
20	1.40	1.48	2.25	2.31	2.29

ตารางข้อมูลที่ 31 ผลการวัดความส่องสว่างของหลอดปล่อยประจุความเข้มสูง

เวลา (นาที)	ความส่องสว่าง (lux)		
	หลอดแสงจันทร์	หลอดเมทัลฮาไลด์	หลอดโซเดียมความดันสูง
1	8,590	17,940	7,730
2	14,610	23,900	33,000
3	19,200	24,800	31,000
4	19,700	25,100	31,400
5	19,900	25,000	30,100
6	18,700	25,800	29,900
7	19,300	25,400	30,000
8	18,600	25,700	29,300
9	18,700	26,100	29,200
10	18,600	26,200	29,200
11	20,000	25,700	30,200
12	20,000	25,400	29,800
13	20,200	24,900	29,300
14	19,500	25,000	28,900
15	19,800	25,500	30,000
16	19,400	25,300	29,200
17	19,700	25,000	30,000
18	19,800	25,200	28,900
19	19,900	25,200	29,700
20	19,400	25,500	29,000