สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกี

DEVELOPMENT OF A CZOCHRALSKI CRYSTAL GROWTH SYSTEM

หนังสืออ้างอิง
ห้ามนำออกนอกห้องสมุด

นิศาพร เกียรติไพศาลโสภณ
MISS. NISAPORN KIETIPAISALSOPHON

เลขหมู่
เลขทะเบียน 21078
วัน, เดือน, ปี 29 มิ.ย. 2537

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2536

ISBN 974 - 621 - 095 - 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

DEVELOPMENT OF A CZOCHRALSKI CRYSTAL GROWTH SYSTEM

NISAPORN KIETIPAISALSOPHON

A THESIS SUBMITTED IN PATIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE

MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS

GRADUATE SCHOOL

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1993

ISBN 974 - 621 - 095 - 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกี
นักศึกษา	นางสาวนิศาพร เกียรติไพศาลโสภณ
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. เสน่ห์ เอกะวิภาต
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ. อนุพงศ์ สรงประภา
ระดับการศึกษา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2536

บทคัดย่อ

การพัฒนาการสร้างระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกี เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการปลูกแท่งผลึกรูปเดี่ยวของซิลิกอน ส่วนประกอบหลัก ๆ ของระบบ ได้แก่ ห้องปลูกผลึกสุญญากาศเป็นโลหะสเตนเลสทรงกระบอกขนาด 30 เซนติเมตร x 20 เซนติเมตร ตัวทำความร้อนกราไฟต์และฉนวนกั้นความร้อน แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อทำความร้อนขนาด 10 กิโลวัตต์ พร้อมทั้งส่วนควบคุมอุณหภูมิ และส่วนหัวดึงผลึกที่ใช้สเตปปิ้งมอเตอร์ซึ่งควบคุมโดยไมโครโปรเซสเซอร์

อัตราเร็วในการดึงและหมุนสามารถควบคุมได้ในช่วง 0~240 เซนติเมตรต่อชั่วโมง และ 0.25~188 รอบต่อนาทีตามลำดับโดยมีระยะทางในการเคลื่อนที่ถึง 300 มิลลิเมตร ใช้เวลา 40 นาที ในการทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ 1,412 ± 1 องศาเซลเซียส โดยใช้กำลังไฟฟ้า 4.97 กิโลวัตต์ จากผลการทดลองได้กราฟแสดงผลตอบสนองของอุณหภูมิกับระยะทางในแนวดิ่งของห้องปลูกผลึกพบว่าในบริเวณที่จะทำการปลูกผลึกมีความคงที่ของอุณหภูมิสูงสุดเป็นระยะ 2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Development of A Czochralski Crystal Growth System
Student	Miss. Nisaporn Kietlpaisalsophon
Thesis Advisor	Assist.Prof.Dr. Sanay Akavipat
Thesis Coadvisor	Assist.Prof. Anupong Srongprapa
Level of study	Master of Science in Applied Physics
Department	Applied Physics, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic year	1993

ABSTRACT

A Czochralski crystal growth system has been developed for facilitate the growth of silicon ingot. The system mainly consists of a water-cooled 30 cm x 20 cm cylindrical stainless-steel vacuum chamber, a graphite heating element with shields, a 10 kW heater power supply with PID temperature control unit, and a microprocessor-controlled stepping motor-drived crytal pulling head.

The pulling and rotation speed can be controlled in the range of 0~240 cm/hr and 0.25~188 RPM respectively over a total traverse of 300 mm. The warm up time for the system to attain the steady-state temperature of 1,412 $\pm$ 1 ^{o}c is 40 minutes at the power consumption of 4.97 kW. The temperature profile was found to be maximum and flat for a distance of 2 cm at the crystal growth zone.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ความดีต่าง ๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้แด่คุณพ่อประคอง-คุณแม่พรมิตร เกียรติไพศาลโสภณ ซึ่งเป็นกำลังใจที่สำคัญที่สุดแก่ข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษามาโดยตลอด รวมไปถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสน่ห์ เอกะวิภาต และผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา อาจารย์ที่ปรึกษาผู้ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดต่าง ๆ ในการทำวิจัยด้วยความทุ่มเทและเสียสละเวลาอย่างเต็มที่ตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวรรณ คูสำราญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เครือวัลย์ ศีตะจิตต์ ดร.ปรีชา ยุพาพิน อาจารย์วิชิต ศิริโชติ อาจารย์จิตติ หนูแก้ว อาจารย์สนิท หมอกมืด ที่กรุณาชี้แนะแนวทางและคอยให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้ามาด้วยดีสม่ำเสมอ และขอขอบพระคุณ ดร. ฐิตินัย แก้วแดง อาจารย์วิชาญ กกกนฑา ผู้ซึ่งช่วยแก้ไขปัญหาบางประการและเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้า รวมทั้งอาจารย์ทุก ๆ ท่านในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ความสามารถแก่ข้าพเจ้าตั้งแต่ต้นจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ฟูศักดิ์ ชีวสุวิทย์ แห่งภาควิชาเทคโนโลยีการวัดและควบคุมทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ความกรุณาเกี่ยวกับเครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องสแกนเนอร์ เลเซอร์ปรินท์เตอร์ เครื่องฉายสไลด์และอุปกรณ์ในการทำงานหลายอย่าง พร้อมทั้งให้คำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งตลอดเวลา

ท้ายนี้ขอขอบคุณ พี่ปุ๋ย พี่อาร์ พี่นา น้องเอ๋ น้องเม้ง เพื่อน ๆ น้อง ๆ ทุก ๆ ท่าน ทั้งที่คณะวิศวกรรมศาสตร์และคณะวิทยาศาสตร์ที่มีส่วนช่วยเหลือทั้งแรงใจและแรงกายตลอดทั้งเวลาที่มีค่ามากมาย โดยทุก ๆ คนมีส่วนร่วมในความสำเร็จครั้งนี้

ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยและสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายช่วยดลบันดาลให้ทุกท่านที่กล่าวถึงนั้นประสบกับความสำเร็จ.ความสุข ความเจริญ ในชีวิตและหน้าที่การงานทุกประการ

นิศาพร เกียรติไพศาลโสภณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ I
Abstract II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญรูป VI
สารบัญตาราง VIII
บทนำ
บทที่ 1 บทนำ
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
1.3 การดำเนินงานวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ 3

บทที่ 2 เทคโนโลยีของการปลูกผลึก
2.1 การปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำ 5
2.2 การทำซิลิกอนให้บริสุทธิ์ 5
2.3 การเกิดผลึกซิลิกอน 7
2.4 หลักการปลูกผลึกซิลิกอนโดยสรุปด้วยวิธีการ
ของโชคราลสกี 12

บทที่ 3 ระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกีที่พัฒนาขึ้น
3.1 ห้องปลูกผลึก 19
3.2 ระบบหล่อเย็น 22
3.3 ตัวทำความร้อนและฉนวนกั้นความร้อน 24
3.4 ระบบก๊าซเฉื่อย 31
3.5 ระบบสุญญากาศ 33
3.6 ระบบหมุนและดึงผลึก 34

บทที่ 4 ระบบควบคุมการหมุนและดึงผลึก
4.1 สเตปปิ้งมอเตอร์ 40
4.2 ตัวควบคุม 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

4.3 โปรแกรมควบคุมการทำงานของสเตปปิ้งมอเตอร์ 45
4.4 ข้อมูลจำเพาะของระบบหมุนและดึงผลึก 50

บทที่ 5 ระบบจ่ายกำลังและควบคุมอุณหภูมิ
5.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 51
5.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ 54

บทที่ 6 ผลการทดลอง
6.1 การตรวจวัดอุณหภูมิโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ
ด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ 58
6.2 การตรวจวัดอุณหภูมิโดยมีการควบคุมอุณหภูมิ
ด้วยเครื่องควบคุมโดยอัตโนมัติ 62

บทที่ 7 บทสรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อไป
7.1 สรุป 68
7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น 69
7.3 แนวทางในการพัฒนาต่อไป 69

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก ก. รูปแสดงระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกีที่พัฒนาขึ้น
เมื่อมีอุณหภูมิภายในห้องปลูกผลึกเป็น 1,412 องศาเซลเซียส ..... ก-1~ก-3
ภาคผนวก ข. แบบแปลนของชิ้นส่วนในการสร้างระบบปลูกผลึก ..... ข-1~ข-15
ภาคผนวก ค. สเตปปิ้งมอเตอร์ คู่มือวงจรขับและวงจรไมโครโปรเซสเซอร์ ..... ค-1~ค-87
ภาคผนวก ง. ข้อมูลชองเอสซีอาร์และโมดูลของเฟสทริกเกอร์ ..... ง-1~ง-9
ภาคผนวก จ. การควบคุมกระบวนการและคู่มือการใช้ตัวควบคุมพีไอดี ..... จ-1~จ-76

ประวัติผู้เขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงเตาปฏิกรณ์ของการปลูกผลึกด้วยวิธีการแยกโซนหลอม 8
รูปที่ 2.2 แสดงอุปกรณ์ของการปลูกผลึกรูปเดี่ยวโดยวิธีโฟลทติ้งโซน 9
รูปที่ 2.3 แสดงรูปร่างภายนอกในการปลูกผลึกแบบโชคราลสกี 11
รูปที่ 2.4 แสดงแบบจำลองของอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการปลูกผลึกรูปเดี่ยว
ของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนโดยวิธีของโชคราลสกี 14
รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบของการปลูกผลึกภายใต้ความดัน
บรรยากาศของกาซอาร์กอนโดยวิธีของโชคราลสกี 15
รูปที่ 2.6 แสดงการจำลองของการปลูกผลึกรูปเดี่ยวของ
สารประกอบแกลเลียมฟอสไฟส 17
รูปที่ 3.1 แสดงห้องปลูกผลึก ฐานรองห้องปลูกผลึก
และโครงเหล็กที่สร้างขึ้น 21
รูปที่ 3.2 แสดงการหล่อเย็นรอบตัวห้องปลูกผลึก 22
รูปที่ 3.3 แสดงตัวทำความร้อนกราไฟต์ 24
รูปที่ 3.4 แสดงฉนวนกั้นความร้อนกราไฟต์ 25
รูปที่ 3.5 แสดงขั้วไฟฟ้าและฐานรองฉนวนกราไฟต์ 26
รูปที่ 3.6 แสดงขั้วน้ำเข้า-ออก ของฐานรองตัวทำความร้อน
ฐานรองฉนวนกราไฟต์และแป้นด้านล่างของห้องปลูกผลึก 27
รูปที่ 3.7 แสดงการประกอบตัวทำความร้อนและฉนวนกั้นความร้อน
เข้ากับฐานรองและแป้นด้านล่างของห้องปลูกผลึก 28
รูปที่ 3.8 แสดงเบ้าหลอม ตัวทำความร้อนและฉนวนกั้นความร้อน 29
รูปที่ 3.9 แสดงภายในห้องปลูกผลึกเมื่อประกอบส่วนต่าง ๆ
เข้าไปเรียบร้อยแล้ว 30
รูปที่ 3.10 แสดงเกจวัดต่าง ๆ 32
รูปที่ 3.11 แสดงระบบปั๊มสูญญากาศ 33
รูปที่ 3.12 แสดงส่วนควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์ 34
รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะของระบบหมุนและดึงผลึกที่สร้างขึ้น 36
รูปที่ 3.14 แสดงตำแหน่งของขาตั้งทั้งสามของหัวดึงผลึกและน็อต
บนแป้นด้านบนของห้องปลูกผลึก 37
รูปที่ 4.1 แสดงส่วนการหมุนและดึงผลึกที่ประกอบอยู่บนห้องปลูกผลึก 41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 4.2 แสดงการควบคุมการทำงานของสเตปปิ้งมอเตอร์ 42
รูปที่ 4.3 แสดงแผ่นวงจรขับของสเตปปิ้งมอเตอร์ 43
รูปที่ 4.4 แสดงแผ่นวงจรไมโครโปรเซสเซอร์ 44
รูปที่ 4.5 แสดงการต่อส่วนควบคุม ภาคขับ และสเตปปิ้งมอเตอร์ 44
รูปที่ 4.6 แสดงบล็อคไดอะแกรมของวงจรขับสเตปปิ้งมอเตอร์ 45
รูปที่ 4.7 แสดงโฟล์วชาร์ตลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมสเตปปิ้ง
มอเตอร์ในการควบคุมการหมุนและการดึง 47
รูปที่ 5.1 แสดงบล็อคไดอะแกรมในการทดลองใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอยู่เดิม 51
รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะหม้อแปลงไฟฟ้าที่จัดทำขึ้นใหม่ 52
รูปที่ 5.3 แสดงบล็อคไดอะแกรมของการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่จัดทำขึ้นใหม่
สำหรับระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกี 53
รูปที่ 6.1 แสดงบล็อคไดอะแกรมในการทดลองโดยไม่มีการควบคุม
อุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ 58
รูปที่ 6.2 แสดงกราฟของการตรวจวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ
ภายในห้องปลูกผลึกโดยไม่มีการควบคุมด้วยเครื่องอัตโนมัติ 60
รูปที่ 6.3 แสดงบล็อคไดอะแกรมในการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูง
โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ 61
รูปที่ 6.4 แสดงบล็อคไดอะแกรมในการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูง
โดยมีการควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ 62
รูปที่ 6.5 แสดงกราฟของการตรวจวัดอุณหภูมิในแนวที่จะดึงผลึก
กับเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว 64
รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในแนวที่จะดึงผลึก
กับระยะทางภายในห้องปลูกผลึกที่สภาวะคงตัว 65
รูปที่ 6.7 แสดงลักษณะรูปสัญญาณที่เข้าสู่ตัวทำความร้อน
โดยวัดที่สภาวะคงตัวของระบบที่อุณหภูมิ 1,412°c 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 แสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเจอร์เมเนียมและซิลิกอน 4
ตารางที่ 2.1 แสดงจุดหลอมเหลวของสารต่าง ๆ 13
ตารางที่ 3.1 แสดงเทอร์โมคับเปิลกับช่วงอุณหภูมิ 39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เทคโนโลยีขั้นสูงส่วนใหญ่ใช้คุณสมบัติของผลึกเดี่ยว (single crystal) ชนิดต่าง ๆ เป็นตัวกำหนดการทำงาน อาทิเช่น การใช้ผลึกของสารกึ่งตัวนำในอุตสาหกรรมวงจรรวม (integrated circuit) ทรานสดิวเซอร์ (transducer) และการใช้ผลึกของออกไซด์ (oxide) บางชนิดเป็นตัวกลางของเลเซอร์ของแข็ง (solid-state laser) กำลังสูงชนิดต่าง ๆ เป็นต้น

ธาตุซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำและใช้สำหรับสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ การเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมจะเป็นแบบโควาเลนท์บอนด์ทั้งหมดซึ่งผลึกที่มีบอนด์แบบโควาเลนท์นี้จะแสดงคุณสมบัติแข็งและเปราะ ธาตุสำคัญที่เป็นสารกึ่งตัวนำได้แก่ คาร์บอน ซิลิกอน เจอร์เมเนียมและดีบุก ส่วนธาตุที่อยู่ในกลุ่มใกล้เคียงได้แก่ โบรอน อะลูมิเนียม แกลเลียม และอินเดียม หรือในกลุ่มฟอสฟอรัส สารหนู พลวง และบิสมัท ธาตุเหล่านี้เมื่อเติมลงไปในสารกึ่งตัวนำแล้วจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำให้สูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความสำคัญมากในการควบคุมค่าความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ธาตุทั้งสองกลุ่มดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า สารเจือ (impurity) ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมการเติมสารเจือลงไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ การควบคุมสารเจือนี้เรียกว่า การโด๊ป (doping) ปริมาณของสารเจือที่เติมลงไปในสารกึ่งตัวนำถึงจะมีจำนวนน้อยมากแต่จะมีผลทำให้ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก การเตรียมสารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปนี้เรียกว่า เป็นการเตรียมประเภทสารประกอบ ซึ่งการเตรียมสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบให้อยู่ในสภาพผลึกรูปเดี่ยวที่สมบูรณ์และมีคุณภาพดีจะเป็นเรื่องยุ่งยากและลำบากกว่าการเตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุแท้ อย่างไรก็ตามการศึกษาและทดลองการปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุแท้ก็สามารถนำไปสู่การพัฒนาเพื่อที่จะให้มีการโด๊ปในโอกาสต่อไป

สารกึ่งตัวนำที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันคือ ซิลิกอน* (*Si*) ซึ่งในสมัยแรกนั้นสารกึ่งตัวนำที่ใช้กันมากจะเป็นเจอร์เมเนียม** (*Ge*) แต่เนื่องจากแหล่งของเจอร์เมเนียมมีไม่มากและสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้เจอร์เมเนียมมักจะมีคุณสมบัติสู้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้ซิลิกอนไม่ได้ ดังนั้นความนิยมในการใช้เจอร์เมเนียมจึงมีน้อยมากในปัจจุบัน (* ,** ดูสมบัติจากตารางที่ 1.1)

ชั้นเปลือกโลกมีซิลิกอนอยู่ถึง 1 ใน 4 และส่วนใหญ่ที่พบจะเป็นพวกซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งรู้จักกันในชื่อของ ทราย ซึ่งจะต้องไปผ่านกระบวนการทำซิลิกอนบริสุทธิ์เพื่อให้ได้สิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติดี ปัญหาใหญ่ในการปฏิบัติคือ การผลิตสารกึ่งตัวนำให้มีความบริสุทธิ์สูงและมีข้อบกพร่อง (defect) ของโครงผลึกน้อย ความสมบูรณ์ของผลึกที่ใช้จะมีความหมายต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์นั้น ๆ อันเป็นสิ่งสำคัญประการแรก

มีอยู่สองวิธีที่นิยมทำให้เกิดแท่งผลึกเดี่ยวของซิลิกอน (single crystal silicon ingot) สำหรับสารกึ่งตัวนำคือวิธีแบ่งโซนหลอม (zone-refining) และวิธีของโชคราลสกี (Czochralski) ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป แต่การปลูกผลึกรูปเดี่ยวซิลิกอนส่วนใหญ่นิยมใช้วิธีการปลูกผลึกแบบโชคราลสกีมากกว่าเพราะสามารถให้แท่งผลึกที่ใหญ่กว่า

สำหรับประเทศไทยยังไม่มีสถาบันการศึกษาใดทำการปลูกผลึกด้วยวิธีการปลูกผลึกแบบโชคราลสกี ทั้งนี้สาเหตุหนึ่งเป็นได้ว่าระบบที่สมบูรณ์ซึ่งหาซื้อได้จากต่างประเทศนั้นมีราคาแพงมาก ดังนั้นได้จึงเห็นความสำคัญที่จะศึกษาและพัฒนาสร้างระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกีขึ้นโดยพยายามใช้วัสดุที่หาได้ภายในประเทศประกอบเข้ากับชิ้นส่วนเครื่องมือที่มีอยู่เดิม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อสร้างและพัฒนาระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกีขึ้นจากชิ้นส่วนเครื่องมือที่มีอยู่เดิมและชิ้นส่วนที่หาได้ภายในประเทศ เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาเทคโนโลยีการปลูกผลึกรูปเดี่ยวของซิลิกอน ทั้งที่เป็นประเภทผลึกของสารบริสุทธิ์และสารประกอบต่อไปในอนาคต

1.3 การดำเนินงานวิจัย

ทำการค้นคว้าและศึกษาทฤษฎีของระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกีจากหนังสือ วารสารหรือเอกสารต่าง ๆ ออกแบบสร้างและพัฒนาระบบนี้ขึ้นจากชิ้นส่วนบางอย่างที่มีอยู่แล้วให้เหมาะสมสำหรับการปลูกผลึกเดี่ยวซิลิกอนด้วยวิธีการของโชคราลสกี ซึ่งชิ้นส่วนที่มีอยู่เดิมได้แก่ ห้องปลูก (stainless-steel growth chamber) ระบบปั๊มสุญญากาศ (vaccum-pump system) และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าต่าง ๆ ระบบปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้นมาจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญดังนี้คือ ห้องปลูกผลึก (growth chamber) ระบบหล่อเย็น (cooling system) ตัวทำความร้อนและฉนวนกั้นความร้อน (heater element and shield) ระบบหมุนและดึงผลึก (crystal pulling head system) ระบบสุญญากาศ (vacuum pump system) ระบบกาซเฉื่อย (inert-gas system) ระบบควบคุมอุณหภูมิ (temperature control system) ตัวจ่ายกำลังไฟฟ้า (power supply) เมื่อประกอบชิ้นส่วนของทุกระบบเข้าด้วยกันแล้วทำให้ภายในห้องปลูกผลึกเป็นสุญญากาศและเปิดระบบหล่อเย็นให้กับห้องทดลองจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบพร้อมทั้งมีการควบคุมอุณหภูมิ ทำการแก้ไขและปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น สรุปผลงานวิจัยและเสนอแนะแนวทางเพื่อการพัฒนาต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้

ได้ศึกษาและเรียนรู้เครื่องมือที่เกี่ยวข้องตลอดจนวิธีการสร้างเตาปลูกผลึกแบบโชคราลสกี อันเป็นวิธีมาตรฐานอันหนึ่งในการผลิตผลึกเดี่ยวของซิลิกอน ซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นของงานวิจัยการปลูกผลึกซิลิกอนแบบโชคราลสกี เป็นตัวอย่างและแนวทางในการพัฒนาวิธีการผลิตสารกึ่งตัวนำซึ่งนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขั้นสูงขึ้นในประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติของสารกึ่งตัวนำเจอร์เมเนียมและซิลิกอน

สมบัติ	เจอร์เมเนียม	ซิลิกอน
จุดหลอมละลาย (melting point), °C	936	1412
ความหนาแน่นที่ 25°C (density), g/cm^3	5.323	2.329
สัมประสิทธิ์การยืดตัวความร้อน (thermal expansion coefficient) ที่ 25°C , ต่อ 1°C	6.1x10^{-6}	4.2x10^{-6}
ความนำเนื่องจากความร้อน (thermal condutivity) ที่ 25°C, cal/sec.cm.°C	0.14	0.20
ความร้อนจำเพาะ (specific heat) ที่ 0-100°C, cal/g.°C	0.074	0.181
น้ำหนักอะตอม (atomic weight)	72.60	28.08
จำนวนอะตอม (atomic number)	32	14
ค่าคงตัวแลททีส (lattice constant) ที่ 25°C, cm	5.657x10^{-8}	5.429x10^{-8}
ความหนาแน่นของอะตอม, atoms/cm^3	4.42x10^{22}	4.96x10^{22}
ค่าคงตัวไดอิเล็คตริก (dielectric constant)	16	12
ความกว้างของช่องว่างพลังงาน (energy band gap) ที่ 300°k, eV	0.72	1.1
ความคล่องตัวของอิเล็คตรอน (electron mobility), cm^2/V-sec	3900	1350
ความคล่องตัวของโฮล (hole mobility), cm^2/V-sec	1900	480
ค่าคงที่ในการแพร่ของอิเล็คตรอน (electron diffusion constant) , cm^2/sec	100	34.6
ค่าคงที่ในการแพร่ของโฮล(hole diffusion constant), cm^2/sec	48.7	12.3

ตารางที่ 1.1 แสดงสมบัติของสารกึ่งตัวนำเจอร์เมเนียมและซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เทคโนโลยีของการปลูกผลึก

2.1 การปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำ

สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำอาจนิยามได้ว่าคือ อุปกรณ์หรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ทุกชนิดที่ถูกผลิตขึ้นมาจากวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำ โดยอาจเป็นได้ทั้งอุปกรณ์ประเภทแพสซีพ (passive elements) เช่น ตัวความต้านทานหรือตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ หรืออุปกรณ์ประเภทแอ็กทีพ (active elements) เช่นไดโอดชนิดต่าง ๆ หรือทรานส์ซิสเตอร์ต่าง ๆ เป็นต้น สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วนั้นได้ถูกสร้างขึ้นมาจากผลึกของสารกึ่งตัวนำ โดยมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบผลึกรูปเดี่ยว (single crystal) ความสมบูรณ์ของผลึกที่ใช้จะมีความหมายต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์นั้น ๆ ในทางปฏิบัติสามารถจำแนกผลึกออกได้ตามคุณสมบัติของผลึกคือ ผลึกหลายรูป (polycrystal) ซึ่งหมายถึงผลึกยังไม่สมบูรณ์ที่สุด กล่าวคือ ยังมีบางส่วนซึ่งมีสภาพไม่ใช่ผลึก อีกชนิดหนึ่งคือ ผลึกรูปเดี่ยว (single crystal) ผลึกชนิดนี้จัดได้ว่าเป็นผลึกที่สมบูรณ์ที่สุด กล่าวคือ มีสภาพเป็นผลึกตลอดเนื้อสารนั้น ดังนั้นเพื่อการสร้างให้ได้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ผลึกรูปเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำจึงถูกนำไปใช้ในการสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ

ในการสร้างผลึกรูปเดี่ยว ปกติมักจะใช้คำว่า " ปลูกผลึก " ในการสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำชนิดใด จำเป็นที่จะต้องใช้ เม็ดผลึก (seed) ของสารนั้นมาเป็นต้นแบบ และในปัจจุบันนี้มีการสร้างผลึกรูปเดี่ยวที่นิยมกันมากอยู่สองวิธีดังได้กล่าวถึงมาแล้วในบทที่ 1 คือวิธีการแยกโซนหลอม และวิธีดึงผลึก (pulling method) หรือเรียกว่าวิธีของโชคราลสกีนั่นเอง

อย่างไรก็ตามในการปลูกผลึกรูปเดี่ยวของซิลิกอนนั้นจะต้องมีการเตรียมสารซิลิกอนที่บริสุทธิ์เพื่อใช้ในการปลูกผลึกขึ้นมาก่อน โดยผ่านขั้นตอนที่เรียกว่า การทำซิลิกอนให้บริสุทธิ์ดังต่อไปนี้

2.2 การทำซิลิกอนให้บริสุทธิ์

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าสารกึ่งตัวนำพวกซิลิกอนเป็นที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันอีกทั้งซิลิกอนเป็นธาตุที่มีมากเป็นที่สองรองจากออกซิเจน มีอยู่ในธรรมชาติเป็นซิลิกาหรือทรายหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และเป็นแร่ซิลิเกตมากมายหลายชนิด ซิลิกอนมีลักษณะเป็นเงามันคล้ายเงิน เตรียมได้ด้วยขั้นตอนต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนแรก

นำทราย (SiO_2) และคาร์บอน (C) มาผสมกันในเตาหลอมที่ใช้ไฟฟ้า (electric arc furnace) ซึ่งทำให้เกิดปฏิกริยาดังนี้

$$SiO_2 + 2C = Si + 2CO$$

จากขั้นตอนนี้ซิลิกอนไดออกไซด์กลายเป็นซิลิกอนที่มีความบริสุทธิ์ถึง 99 เปอร์เซนต์ มีคุณสมบัติทางโลหะ นั่นคือซิลิกอนนำไฟฟ้าได้ต่ำกว่าโลหะเล็กน้อย

ขั้นตอนที่สอง

ซิลิกอนที่ได้จากขั้นตอนแรกถูกทำให้บริสุทธิ์อีกครั้งโดยการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไตรคลอโรซิเลน ($SiHCl_3$) โดยเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1260 องศาเซลเซียส ซึ่งมีสมการปฏิกริยาดังนี้

$$Si + 3HCl = SiHCl_3 + H_2$$

ไตรคลอโรซิเลนเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นและทำให้แข็งตัวด้วยคลอไรด์ชนิดต่าง ๆ เช่น คลอไรด์ของทองแดง, เหล็ก, ฟอสฟอรัสและโบรอน

ขั้นตอนที่สาม

เป็นขั้นตอนสุดท้าย โดยนำเอาไตรคลอโรซิเลนบริสุทธิ์มาทำให้ร้อนร่วมกับไฮโดรเจน ทำให้เกิดซิลิกอนบริสุทธิ์และกรดไฮโดรคลอริก ปฏิกิริยานี้จะทำในเตาปฏิกรณ์เคมี (chemical vapour deposition ; CVD) ผลที่ได้ออกมาคือ แท่งซิลิกอนที่ยาว 2 ถึง 3 เมตร ได้เส้นผ่าศูนย์กลางถึง 20 เซนติเมตร และแท่งซิลิกอนที่ได้ในขั้นตอนนี้เองจะนำไปใช้สำหรับทำเป็นผลึก (crystal) ต่อไป กระบวนการที่ทำซิลิกอนให้บริสุทธิ์ดังที่กล่าวมาแล้วนี้ใช้เวลานานหลายชั่วโมง

อีกวิธีหนึ่งในการทำซิลิกอนให้บริสุทธิ์โดยการนำซิลิกอนไดออกไซด์มาทำปฏิกิริยาดังนี้

$$SiO_2 + 2C = Si + 2CO$$

ซิลิกอนที่ได้จากปฏิกิริยานี้ยังไม่บริสุทธิ์ ต้องนำไปทำปฏิกิริยาโดยตรงกับคลอรีน จะได้สารประกอบซิลิกอนเตตระคลอไรด์

$$Si + 2Cl_2 = SiCl_4$$

ซิลิกอนเตตระคลอไรด์เป็นสารที่ระเหยเป็นไอได้ จึงทำให้บริสุทธิ์ได้ง่ายโดยการกลั่น แล้วนำไปรีดิวซ์ด้วยกาซไฮโดรเจนเพื่อให้ได้ซิลิกอน

$$SiCl_4 + 2H_2 = Si + 4HCl$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วจึงนำซิลิกอนที่ได้มาทำให้บริสุทธิ์ โดยกระบวนการหลอมเหลวเป็นเขต (zone melting process) การทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการนี้ ซิลิกอนจะหลอมเหลวออกมาตามราง เป็นช่วงสั้น ๆ เมื่อปล่อยให้ไหลไปช้า ๆ สารต่าง ๆ ที่เจือปนทำให้ไม่บริสุทธิ์จะรวมกันอยู่ทางตอนท้ายของแท่งซิลิกอน เมื่อทำซ้ำอีกเรื่อย ๆ และแยกท่อนซิลิกอนข้างที่มีสิ่งไม่บริสุทธิ์ออกแล้วจะได้แท่งซิลิกอนที่บริสุทธิ์ ซิลิกอนซึ่งมีความบริสุทธิ์เป็นพิเศษนั้นมีประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มาก คือใช้ทำทรานส์ซิสเตอร์ ไดโอด และไอซี (integrated circuit) ซึ่งมีความสำคัญมากในยุคปัจจุบัน

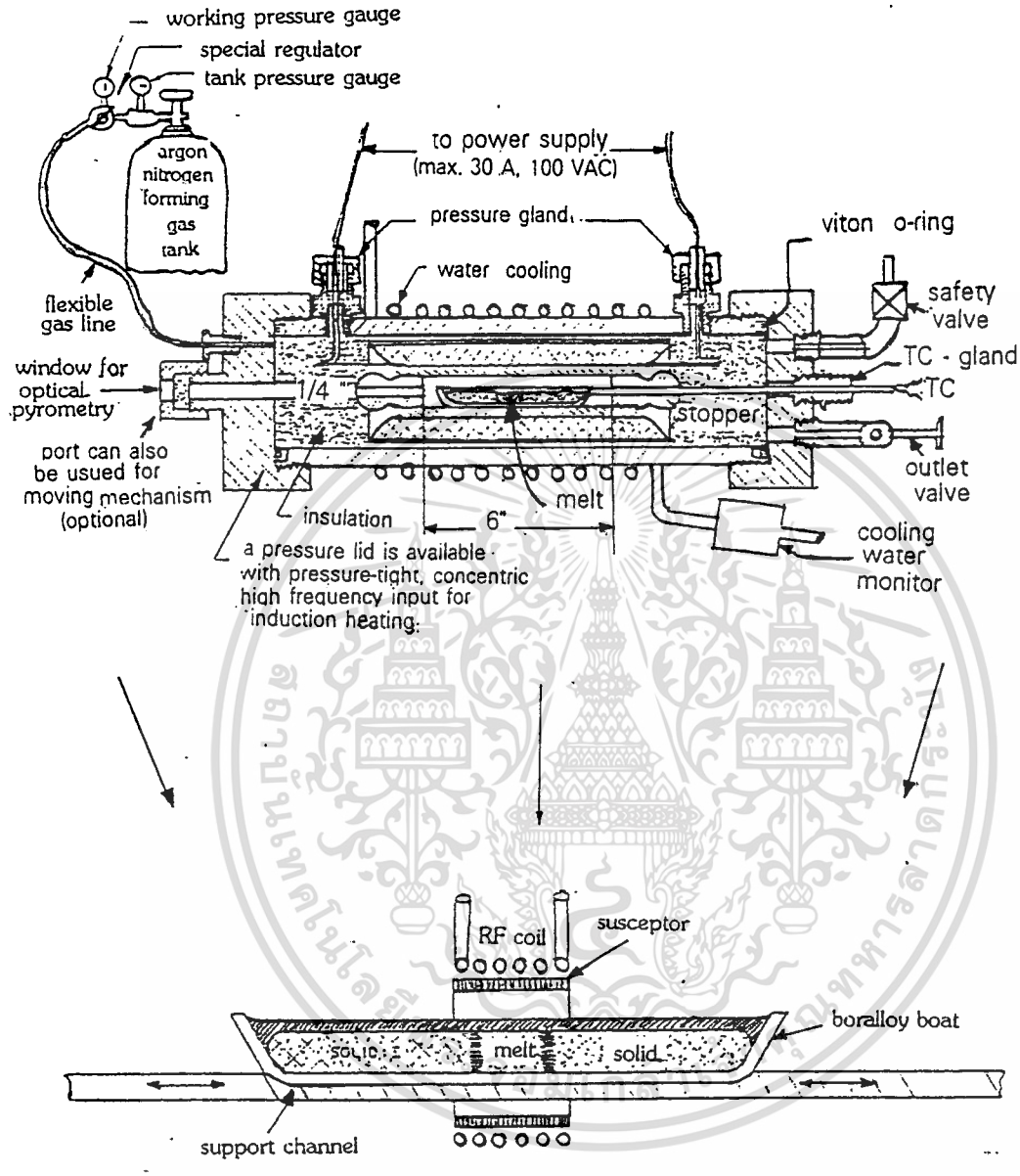
2.3 การเกิดผลึกซิลิกอน

หลังจากที่ได้ซิลิกอนบริสุทธิ์มาแล้วก็จะมาถึงขั้นตอนในการปลูกผลึก สำหรับการปลูกผลึกรูปเดี่ยวซิลิกอนมีสองวิธีที่นิยมกันดังที่กล่าวมาแล้วคือ

2.3.1 วิธีการปลูกผลึกโดยวิธีการแยกโซนหลอม

วิธีการปลูกผลึกโดยวิธีการแยกโซนหลอมเป็นวิธีการสร้างผลึกรูปเดี่ยว โดยมีอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 หลักการของวิธีนี้คือ การทำให้แท่งผลึกหลายรูปของสารกึ่งตัวนำถูกหลอมละลายกลายเป็นของเหลวเฉพาะในบางส่วนที่ถูกความร้อนหลอม ซึ่งส่วนของสารกึ่งตัวนำที่หลอมเหลวนี้ยังสามารถอยู่ได้ระหว่างส่วนของสารกึ่งตัวนำที่เป็นของแข็ง เมื่อเลื่อนตำแหน่งของขดลวดเหนี่ยวนำ (induction coil) หรือเลื่อนแท่งผลึกหลายรูปก็ตามบริเวณหลอมละลายในแท่งผลึกหลายรูปก็จะเปลี่ยนไป ส่วนที่เคยหลอมเหลวก็จะแข็งตัวและกลายเป็นผลึกรูปเดี่ยวขึ้น ในวิธีการแยกโซนหลอมแท่งซิลิกอนถูกใส่ไว้ในห้องปลูกผลึก (chamber) โดยยึดติดกับตัวจับเม็ดผลึก (seed holder) ที่ปลายข้างหนึ่ง สิ่งซึ่งไม่บริสุทธิ์ทั้งหลายก็จะถูกปัดออกมาไว้ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งผลึก ดังนั้นเมื่อตัดปลายทั้งสองด้านของแท่งผลึกนี้ทิ้ง ก็จะทำให้ได้แท่งผลึกรูปเดี่ยวที่บริสุทธิ์มากและสมบูรณ์ยิ่ง จะสังเกตเห็นว่าการปลูกผลึกด้วยวิธีการแยกโซนหลอมจะไม่ใช้เบ้าหลอม จึงไม่มีออกซิเจนมาทำให้ผลึกไม่สมบูรณ์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

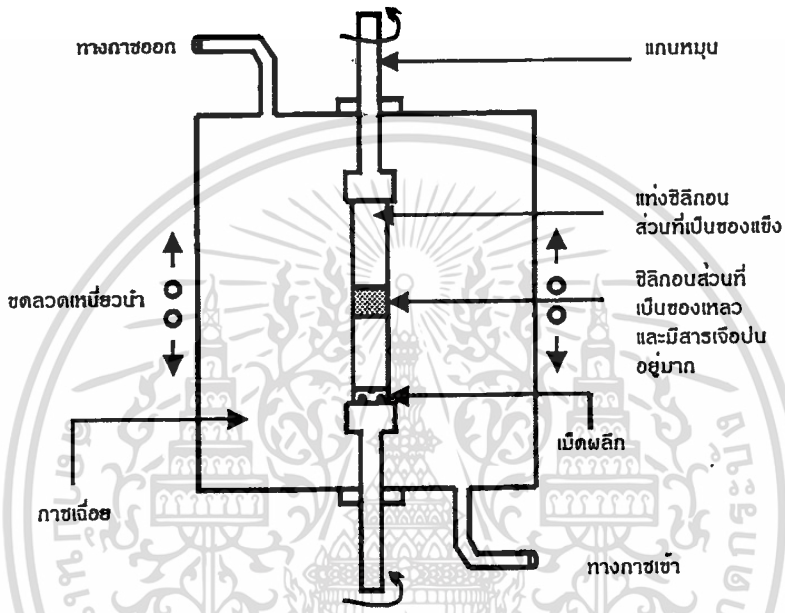


รูปที่ 2.1 แสดงเตาปฏิกรณ์ของการปลูกผลึกด้วยวิธีการแยกโซนหลอม

การปลูกผลึกด้วยวิธีการแยกโซนหลอมนี้จะใช้สำหรับในกรณีที่ต้องการผลึกรูปเดี่ยวที่มีความบริสุทธิ์มากหรือเมื่อต้องการที่จะโด๊ปด้วยสารเจือก็สามารถทำได้เช่นกัน โดยการจัดให้แท่งผลึกหลายรูปอยู่ในลักษณะแนวตั้ง ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า วิธีโฟลทติ้งโซน (Floating Zone) ดังแสดงในรูปที่ 2.2. ห้องปลูกผลึกถูกเติมด้วยกาซเฉื่อยและเริ่มให้ความร้อนโดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำหรือขดลวดความถี่วิทยุ (RF coil) โดยเริ่มต้นที่ปลายเม็ดผลึก ส่วนที่หลอมเหลวและส่วนที่เป็นของแข็งของแท่งผลึก ขดลวดเหนี่ยวนำจะเคลื่อนที่ขึ้นข้างบนทำให้แท่งผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(rod) เป็นโครงสร้างเดียวกันกับเม็ดผลึก โบรอนหรือฟอสฟอรัสใช้เป็นสารเจือปนในกระบวนการแยกโซนหลอม โดยใช้ในรูปของกาซเพื่อให้มีความต้านทานสม่ำเสมอตลอดทั้งแท่งและด้วยวิธีการดังกล่าวในที่สุดจะได้แท่งผลึกรูปเดี่ยวที่ถูกเจือด้วยสารเจืออย่างสม่ำเสมอ เส้นผ่าศูนย์กลางของผลึกจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของขดลวดเหนี่ยวนำ แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดอยู่ก็คือ ขนาดของแท่งผลึกที่สร้างได้จะมีขนาดไม่ใหญ่โตนัก คือมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางไม่กี่เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากแรงตึงผิวมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้ผลึกทรงตัวอยู่ได้ เพราะถ้ามีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้แท่งผลึกเสียหายได้



รูปที่ 2.2 แสดงอุปกรณ์การปลูกผลึกรูปเดี่ยวโดยวิธีโฟลทดิ้งโซน

จากแท่งผลึกรูปเดี่ยวที่สร้างขึ้นมาได้ด้วยวิธีต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วนี้ แท่งผลึกก็จะถูกนำไปตัดออกเป็นแผ่นบาง ๆ ซึ่งเรียกกันว่า แผ่นผลึก (crystal wafer) มีขนาดความหนาราว 200-300 ไมครอน โดยการใช้เลื่อยชนิดพิเศษ แผ่นผลึกเหล่านี้จะนำไปสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ ต่อไป ตัวอย่างเช่นวัสดุที่มีความต้านทานสูงซึ่งผลิตโดยใช้วิธีการแยกโซนหลอม ได้แก่ SCR (Silicon Controlled Rectifier), ไดโอดกำลัง (power diode) และทรานส์ซิสเตอร์ (transistor) ต่าง ๆ เป็นต้น

2.3.2 วิธีการดึงผลึกหรือวิธีของโชคราลสกี

เทคนิคการปลูกผลึกอีกอย่างหนึ่งคือ การดึงผลึกจากสารหลอมเหลว (melt) ที่อยู่ในเบ้าหลอม (crucible) ซึ่งเริ่มทำกันครั้งแรกโดยโชคราลสกี (Czochralski) ในปี ค.ศ 1917 ผลที่ได้คือการปลูกผลึกที่ไม่มีการบังคับทางกายภาพ (ไม่กำหนดรูปร่าง) ดังแสดงในรูปที่ 2.3a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งจำเป็นคือสารหลอมเหลวที่อยู่ในเบ้าหลอมมักจะมีปฏิกิริยากับสิ่งสกปรกซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากและเป็นข้อเสียหายของเทคนิคนี้ ได้มีการปรับปรุงเทคนิคนี้ไปหลายรูปแบบด้วยกัน แต่กฎเกณฑ์ที่จะทำให้เทคนิคการดึงผลึกประสบความสำเร็จได้นั่นคือ

1. ผลึกจะต้องหลอมละลายกลายเป็นสารหลอมเหลวเนื้อเดียวกันทั้งหมดในเบ้าหลอม โดยปราศจากสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ ไม่เช่นนั้นผลึกที่ปลูกได้จากสารหลอมเหลวที่ไม่บริสุทธิ์อาจจะมีเสถียรภาพบางจุดเท่านั้น อย่างไรก็ตามการปลูกผลึกจากสารประกอบก็สามารถทำได้ด้วยวิธีการสร้างผลึกจากสารละลาย (solution growth) ถ้าสิ่งแปลกปลอมดังกล่าวเกิดจากอากาศก็เป็นไปได้ที่เราจะใช้วิธีการปลูกในระบบปิดที่ความดันเหมาะสม สิ่งแปลกปลอมก็จะไม่มีผลกับผลึก

2. ผลึกไม่ควรมีปฏิกิริยากับเบ้าหลอมหรือกับบรรยากาศตลอดการดึง ซึ่งในระบบปิดที่มีกาซเฉื่อยอยู่ การเกิดออกซิไดซ์หรือการเกิดปฏิกิริยากับบรรยากาศจะไม่มีผล

3. จุดหลอมเหลวของสารที่ใช้ควรจะอยู่ในขอบเขตที่ตัวทำความร้อนสามารถทำได้และควรจะต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเบ้าหลอมด้วย

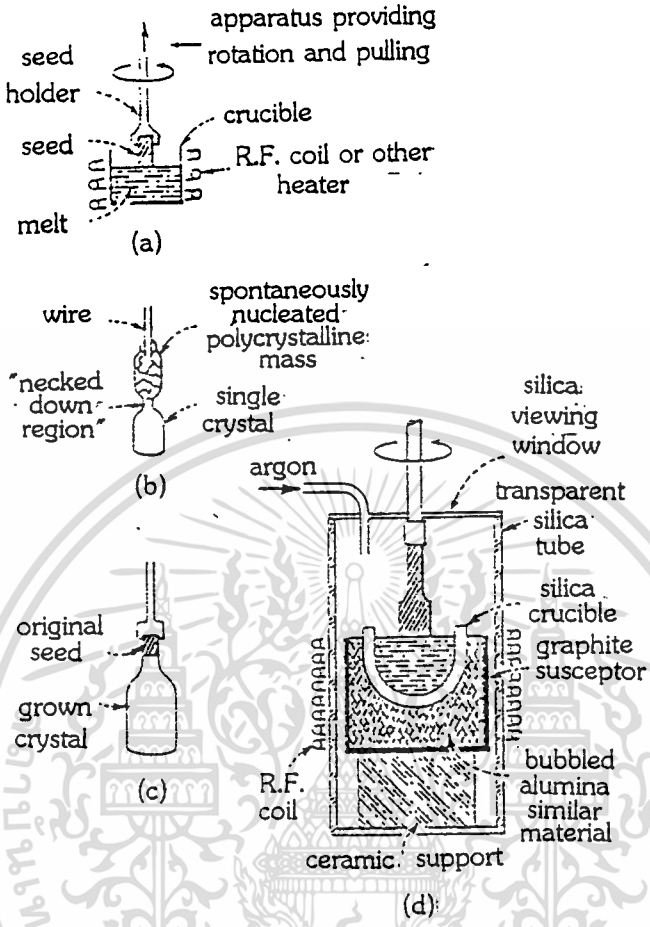
4. ควรจะมีการควบคุมอัตราการดึงและเกรเดียนท์ (gradient) ของอุณหภูมิไว้จุดที่ซึ่งผลึกเดี่ยวสามารถก่อตัวได้

ประโยชน์ของหลักการดึงผลึกก็คือ การปลูกผลึกสามารถทำได้ด้วยเม็ดผลึก (seed) ภายใต้เงื่อนไขการควบคุมที่ดีมาก ๆ ผลของการควบคุมที่ดีนั้นเราสามารถเห็นเม็ดผลึกและผลึกที่ถูกปลูกขึ้นมาด้วยตาเปล่าตลอดการปลูกซึ่งสามารถทำให้ปรับปรุงการควบคุมให้สมบูรณ์แบบยิ่งขึ้นได้

เริ่มเดิมทีนั้นโซคราลสกีใช้เป็นเทคนิคการดึงสำหรับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น ตะกั่ว, ดีบุกและสังกะสี แสดงดังรูปที่ 2.3d แสดงให้เห็นหลักพื้นฐานในการทำ หลังจากนั้นต่อมาเทคนิคนี้ถูกใช้สำหรับหลอมละลายสารประกอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน และคาดว่าสามารถประยุกต์ใช้ได้กว้างที่สุดโดยใช้ทำสารกึ่งตัวนำ (semiconductor material)

การปลูกผลึกด้วยวิธีนี้สามารถกำหนดทิศทางได้ง่ายโดยการควบคุมเม็ดผลึกให้สามารถพลิกหรือหันเปลี่ยนทิศทางได้ ถ้าเม็ดผลึกไม่สามารถหาได้หรือไม่ได้ใช้เม็ดผลึกในการปลูกผลึกจะเกิดขึ้นอย่างไร้ทิศทาง (spontaneously-nucleated crystallization) โดยเริ่มก่อตัวไปบนเส้นลวด (wire) เป็นระยะทางสั้น ๆ จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางจะลดลง (ดังรูปที่ 2.3b) โดยการค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิเล็กน้อยหรือโดยเพิ่มอัตราการดึง ในทางปฏิบัติการเพิ่มอัตราการดึงนั้นเป็นวิธีการที่ยากที่ใช้เพื่อทำให้เกิดส่วนคอ (neck) จนกระทั่งได้เม็ดผลึกออกมาจากสารหลอมเหลว หลังจากการเกิดส่วนคอแล้ว ผลึกเดี่ยวก็จะถูกสร้างขึ้นมา เส้นผ่าศูนย์กลางของผลึกจะเพิ่มขึ้นโดยใช้เทคนิคของการปลูกผลึกรูปเดี่ยวด้วยวิธีนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงรูปร่างภายนอกในการปลูกผลึกแบบโชคราลสกี

ถ้าเม็ดผลึกสามารถหาได้ก็จะเริ่มปลูกผลึกบนเม็ดผลึก (แสดงดังรูปที่ 2.3c) เริ่มจากเส้นผ่าศูนย์กลางน้อย ๆ และเพิ่มเส้นผ่าศูนย์กลางของผลึกอย่างช้า ๆ โดยการลดอุณหภูมิจนกระทั่งได้เส้นผ่าศูนย์กลางที่ต้องการ การกำเนิดนิวเคลียสของผลึกมักทำได้ดีบนผลึกที่มีพื้นที่เล็ก ๆ ถ้าผลของการปลูกไม่ดีก็สามารถนำกลับลงไปหลอมเหลวใหม่ได้ง่ายเพื่อจะนำกลับมาปลูกขึ้นใหม่

Teal และ Little (1950) ได้เริ่มผลิตผลึกเดี่ยวของเจอร์เมเนียมและซิลิกอน และในงานนี้ทำให้ทราบถึงการเตรียมคุณสมบัติของผลึกที่ดีที่สุดของสารเซมิคอนดักเตอร์สำหรับการวิจัยและพัฒนาประยุกต์ต่อไป เทคนิคการดึงผลึกนี้เป็นเทคนิคทางการค้าที่สำคัญมากในเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nassau และ Van Uitert (1960) ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคนี้เพื่อสร้างสารประกอบที่ใช้เป็นตัวกลางของเลเซอร์ และในเอกสารต่าง ๆ ของ Nassau ก็ได้อธิบายถึงการปลูกผลึกและคุณสมบัติของ $CaWO_2 : Nd$ (Nassau & Broyer; 1962; Johnson & Nassau , 1961)

และนับได้ว่า Gilman (1963) เป็นแนวทางที่ดีที่ทำให้เกิดการยอมรับเทคนิคการดึงและเป็นที่ปรากฏแก่สาธารณชน

สำหรับการปลูกผลึกแบบโชคราลสกีจำเป็นต้องมีสิ่งต่อไปนี้คือ

1. สิ่งที่จะทำความร้อนให้กับสารเพื่อหลอมเหลวและการควบคุมอุณหภูมิของสารหลอมเหลวนั้น
2. สิ่งที่จะใช้บรรจุสารหลอมเหลว
3. สิ่งที่จะใช้เป็นตัวจับผลึก ตัวหมุน และตัวดึงผลึกขึ้น
4. สิ่งที่จะใช้ควบคุมความดันบรรยากาศภายในบริเวณปลูกผลึก

ตัวทำความร้อนหลัก ๆ ได้แก่ความถี่คลื่นวิทยุ (radio-frequency) และตัวทำความร้อนแบบตัวต้านทาน (resistance heating) ตัวทำความร้อนแบบใช้ความถี่คลื่นวิทยุต้องคำนึงถึงสารหลอมเหลว และเบ้าหลอมที่จะเป็นตัวนำหรือส่งผ่านคลื่นที่ดีพอ หรือเตาหลอมจะต้องใช้ให้เหมาะสมกับสนามความถี่นั้น ๆ ด้วยเพื่อจะเป็นตัวส่งผ่านความร้อนที่ดีแก่สาร อย่างเช่นความถี่ 450 กิโลเฮิร์ซ (kHz) เหมาะสำหรับการให้ความร้อนแก่เบ้าหลอมที่เป็นควอทซ์ ขนาด 50 ลูกบาสก์เซนติเมตร (cm^3) ซึ่งบรรจุในเตากราไฟท์เพื่อหลอมสารกึ่งตัวนำเจอร์เมเนียมที่มีจุดหลอมเหลว* 937 องศาเซลเซียส (^oC), (* ตารางที่ 2.1) โดยใช้กำลังไฟฟ้า 5 กิโลวัตต์ (kW)

2.4 หลักการปลูกผลึกซิลิกอนโดยสรุปด้วยวิธีการของโชคราลสกี

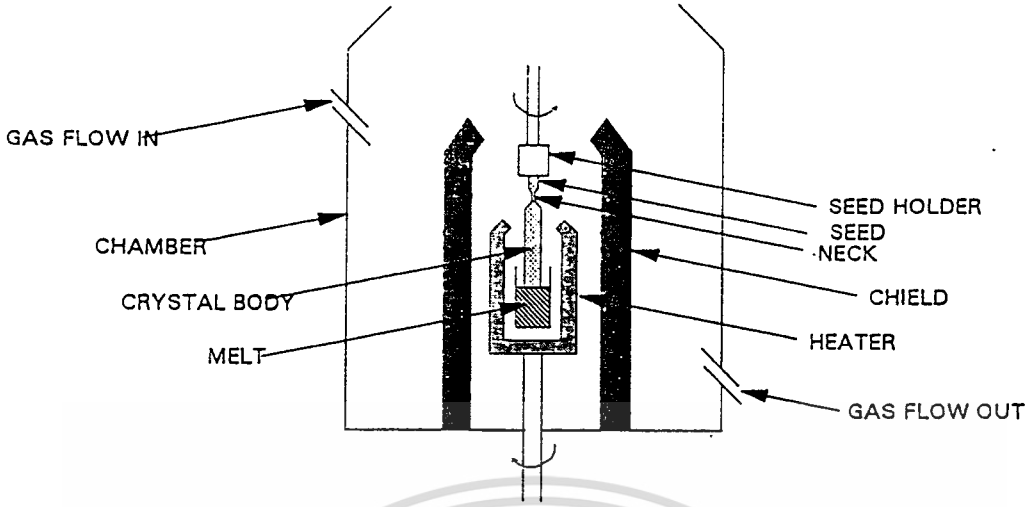
เป็นการสร้างผลึกรูปเดี่ยวจากสารกึ่งตัวนำที่มีสภาพเป็นของเหลว (melt) โดยมีอุปกรณ์ในการสร้างผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Compound	Formular	Melting Point (°C)	Crucible Material	Pulling Rate	Growth Direction	Atmosphere	References
Germanium	Ge	937					See Text
Silicon	Si	1412					See Text
Zinc	Zn	419	Pyrex	1.2 cm/min	Various	N_2	hoyen and tyndall, 1929
Gallium Arsenide	GaAs	1240	Vitreous silica		Various	As	
Potassium Chloride	KCl	770	Pt or porcelain			Air	Kyropoulos, 1930
Water	H_2O	0	Glass		Various	Air	Jona and Scherrer, 1952
Calcium Tungstate	$CaWO_4$	1535	Rh	0.5-2 cm/hr	Various	Air	See Text
Lithium Niobate	$LiNbO_3$	1260	Pt	0.5-2 cm/hr	Various	Air	See Text
Sapphire	Al_2O_3	2050	Ir	0.5-2 cm/hr		Air	See Text
Yttrium-Aluminum Garnet	$Y_3Al_5O_{12}$	~1900	Ir	0.5-2 cm/hr	Various	Air	See Text

ตารางที่ 2.1* แสดงจุดหลอมเหลวของสารต่าง ๆ

* อ้างอิง R.A. Laudise, **The Growth of Single Crystal**, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1970.



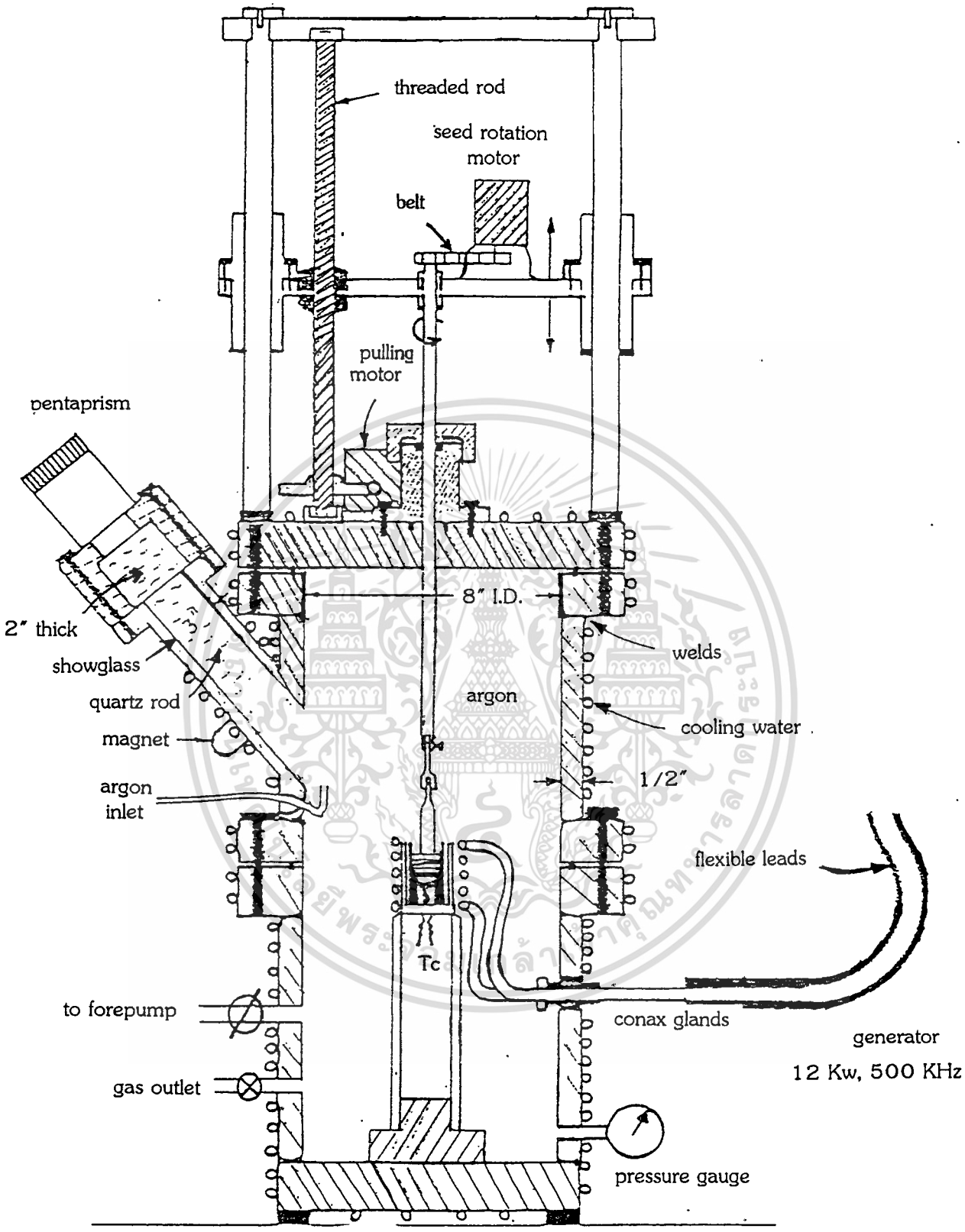
รูปที่ 2.4 แสดงแบบจำลองของอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการปลูกผลึกรูปเดี่ยว ของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนโดยวิธีของโชคราลสกี

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่สกัดมาได้แต่ยังไม่อยู่ในรูปของผลึกเดี่ยว จะถูกนำมาใส่ลงในเบ้าหลอม (crucible) ซึ่งกว่า 90 เปอร์เซนต์ที่ใช้วิธีปลูกผลึกแบบโชคราลสกีจะใช้เบ้าหลอมที่ทำจากซิลิกอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ (quartz) ซึ่งบรรจุภายในใจกลางเตาหลอมชนิดพิเศษหรือที่เรียกว่าห้องปลูกผลึก (growth chamber) และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,412 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดหลอมเหลวของซิลิกอน* (*ตารางที่ 2.1) ภายในเตาจะเป็นบรรยากาศของกาซเฉื่อย เช่นกาซอาร์กอน (*Ar*) หรือฮีเลียม (*He*) ซึ่งเป็นกาซที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารใด ทำให้ไม่เกิดสารเจือปนขึ้นมา การให้ความร้อนมีทั้งวิธีทางความร้อน (thermal) หรือวิธีการเหนี่ยวนำโดยใช้พลังงานความถี่วิทยุ

เมื่อทำให้สารกึ่งตัวนำซิลิกอนหลอมละลายกลายเป็นของเหลวแล้ว การปลูกผลึกรูปเดี่ยวด้วยวิธีนี้ก็จะเริ่มต้นขึ้น โดยการจุ่มเม็ดผลึกที่ต้องการโครงสร้างแลทติซ (lattice) ลงในสารกึ่งตัวนำหลอมเหลวที่อยู่ในเบ้าหลอมโดยให้ติดกับผิวบนของสารกึ่งตัวนำหลอมเหลวนั้น ปลายของเม็ดผลึกจะเริ่มหลอมละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกันกับสารกึ่งตัวนำหลอมเหลวในเบ้าหลอม จากนั้นเม็ดผลึกจะถูกดึงขึ้น (pulling) อย่างช้า ๆ พร้อม ๆ กับหมุน (rotating) ไปด้วยอัตราที่เหมาะสม การที่จะให้เกิดการหลอมละลายตลอดเนื้อสารที่อุณหภูมิคงที่นั้นทำได้ด้วยการกวนโดยการหมุนของตัวจับผลึก (seed holder)

โดยทั่วไปแล้วในทางปฏิบัติ อัตราการดึงที่เหมาะสมนั้นจะแบ่งเป็นช่วงคือ ตอนแรกอัตราการดึงอยู่ระหว่าง 5 ถึง 12 นิ้วต่อชั่วโมง และใช้อัตราเร็วในการดึง 2 ถึง 4 นิ้วต่อชั่วโมงในตอนสุดท้าย ส่วนที่เป็นคอแคบเรียกว่า " Neck " ซึ่งอยู่ติดกับตัวจับผลึกและแท่งผลึก (ดังแสดงในรูปที่ 2.4) นั้นจะถูกดึงขึ้นด้วยอัตราเร็วขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเคลื่อนจากที่ของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบของเตาปลูกผลึกภายใต้ความดันบรรยากาศของกาซอาร์กอน โดยวิธีการของโชคราลสกี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอัตราการหมุนจะอยู่ระหว่าง 6 ถึง 8 รอบต่อนาที เหนือระดับของสารกึ่งตัวนำที่หลอมเหลวอยู่อุณหภูมิจะลดลงเล็กน้อย ทำให้สารกึ่งตัวนำที่หลอมเหลวและติดกับเม็ดผลึกขึ้นมานั้นเริ่มแข็งตัวและแปรสภาพเป็นผลึกรูปเดี่ยวเช่นเดียวกับเม็ดผลึกนั้น และด้วยอัตราการยกขึ้นและหมุนไปรอบแกนอย่างช้า ๆ ที่เหมาะสมของเม็ดผลึก ทำให้ได้แท่งผลึกรูปเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำซึ่งมีแนวและระนาบเหมือนกับเม็ดผลึกทุกประการ

สิ่งสำคัญหลักสำหรับการปลูกผลึกที่ดีโดยวิธีโชคราลสกีคือการดึงและการหมุนควรจะราบเรียบและควบคุมอุณหภูมิของสารหลอมเหลวให้เที่ยงตรง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจริง ๆ ของผลึกขึ้นอยู่กับอัตราการดึง ความเร็วในการหมุน อุณหภูมิของสารหลอมเหลว และยังขึ้นกับขนาดของเม็ดผลึกที่ใช้ ปัจจุบันสามารถสร้างผลึกให้มีขนาดใหญ่ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถึง 10 เซนติเมตร ส่วนความยาวของแท่งผลึกก็ขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการสร้าง อย่างไรก็ตามแท่งผลึกเดี่ยวที่ได้จะมีปริมาตรไม่เกินปริมาตรของสารกึ่งตัวนำหลอมเหลวที่มีอยู่ในเบ้าหลอมด้วยวิธีการที่กล่าวมาแล้วนี้จะทำให้ได้แท่งผลึกรูปเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ซึ่งในที่นี้ก็คือแท่งผลึกรูปเดี่ยวซิลิกอน (silicon crystal ingot) นั่นเอง

นอกจากกรรมวิธีดังกล่าวแล้ว ยังมีข้อได้เปรียบที่ว่าเราสามารถจะผลิตผลึกรูปเดี่ยวที่มีชนิดการนำกระแสหรือความต้านทานจำเพาะตามที่ต้องการได้ โดยการเปลี่ยนชนิดและจำนวนของสารเจือปน ซึ่งจะต้องมีการเติมสารเจือปนเข้าไปในผลึกในขณะที่ยังหลอมเหลวอยู่ก่อนที่จะเกิดการแข็งตัว

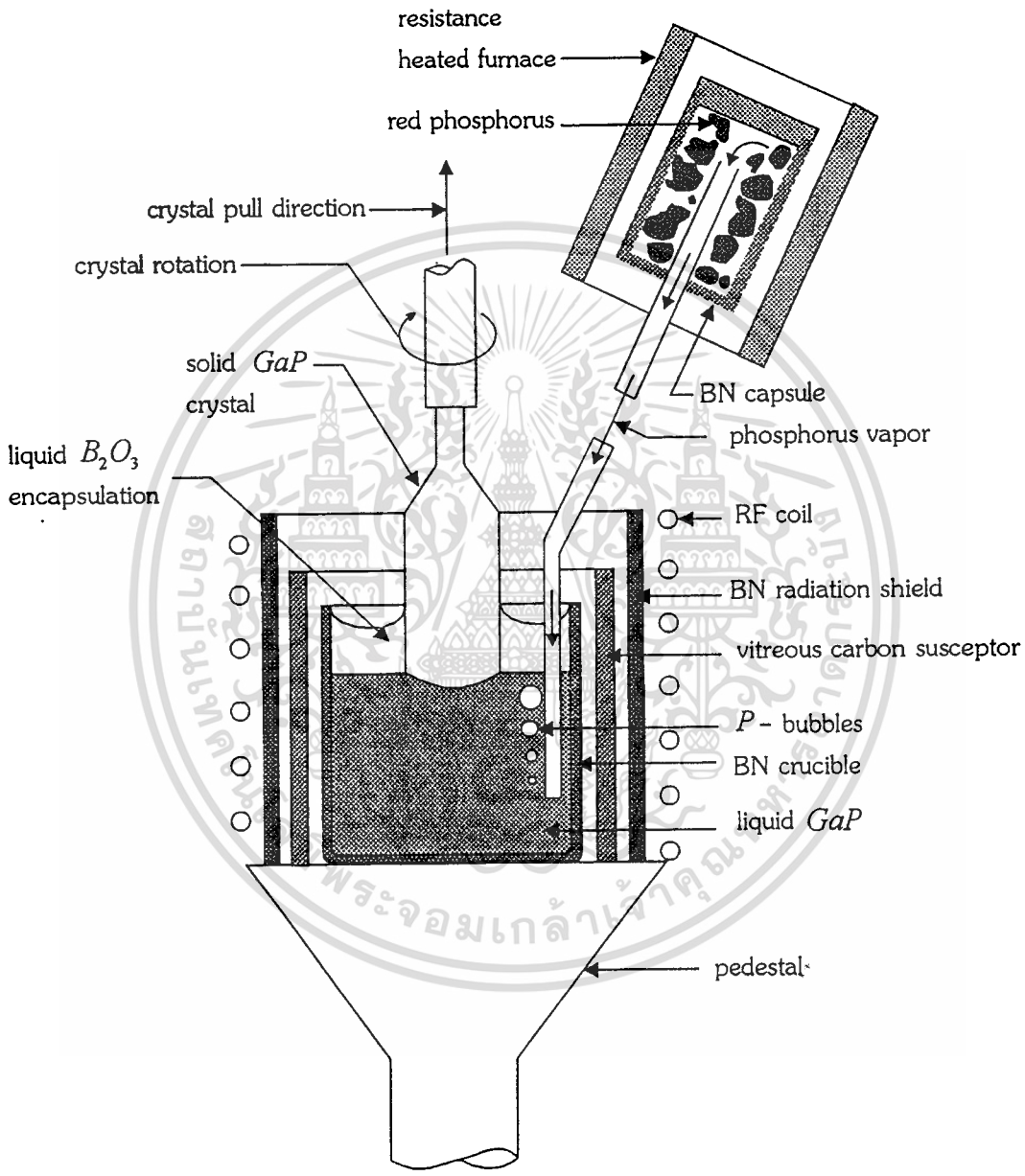
ควอทซ์ถูกใช้เป็นเบ้าหลอมในการปลูกผลึกซิลิกอน โดยควอทซ์เป็นผลึกชนิดหนึ่งของซิลิกา ซึ่งซิลิกาหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,710 องศาเซลเซียส เนื่องจากพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจนเป็นพันธะที่แข็งแรงมาก จึงทำให้ซิลิกาไม่สลายตัวเมื่อให้ความร้อนและไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับสารต่าง ๆ นอกจากนี้ซิลิกายังเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีเยี่ยมถึงแม้ที่อุณหภูมิสูง ๆ และมีสัมประสิทธิ์ในการขยายตัวน้อยมากเมื่อร้อน

ปัญหาใหญ่และต้องระมัดระวังเป็นพิเศษก็คือ เรื่องความสะอาดภายในเตาหลอมรวมทั้งเบ้าหลอม เพราะถ้าหากมีสารอื่นหรือสิ่งแปลกปลอมอื่นที่ไม่ต้องการปะปนอยู่ภายในเตาแล้วจะทำให้ผลึกที่สร้างขึ้นมาได้นั้นไม่บริสุทธิ์และไม่เป็นผลึกรูปเดี่ยวที่สมบูรณ์ มีข้อบกพร่องอยู่สองประการที่อาจเกิดขึ้นในผลึก ประการแรกคือการเคลื่อนจากที่ (dislocation) และประการที่สองคือระนาบผิดไป (planar slip) การเคลื่อนจากที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของความร้อนหรือความเย็น และระนาบที่ผิดไปเกิดขึ้นเมื่อส่วนหนึ่งของผลึกถูกเฉือนไป ข้อบกพร่องดังกล่าวจะป้องกันได้ด้วยเทคนิคการผลิตที่ให้ความสมบูรณ์เพียงพอ แต่สิ่งเหล่านี้ก็สามารถเกิดขึ้นได้อีกจากการจับผลึกในครั้งต่อ ๆ มา

อย่างไรก็ตามวิธีการปลูกผลึกแบบโชคราลสกีก็สามารถที่จะใช้สำหรับการปลูกผลึกรูปเดี่ยวของสารประกอบได้เช่นเดียวกัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงถึงการปลูกผลึกของแกลเลียมฟอสเฟส *(GaP)* จะเห็นว่ามีตัวทำความร้อนอีกอันหนึ่งที่เหมาะสมเพื่อให้ความร้อนแก่สารฟอสฟอรัสที่จะใช้เป็นสารเจือปน ไอของฟอสฟอรัสจะผ่านลงมาตามท่อควอทซ์ไปยังสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกลเลียมที่หลอมเหลว ซึ่งจะต้องมีการควบคุมกระบวนการให้สม่ำเสมอ สามารถทำให้เกิดผลึกรูปเดี่ยวของสารประกอบที่สมบูรณ์ขึ้นมาได้



รูปที่ 2.6 แสดงการจำลองการปลูกผลึกรูปเดี่ยวของสารประกอบแกลเลียมฟอสเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ระบบปลูกผลึกแบบโซคราลสกีที่พัฒนาขึ้น

ได้ทำการออกแบบและสร้างระบบปลูกผลึกแบบโซคราลสกีสำหรับปลูกแท่งผลึกเดี่ยวของซิลิกอน (silicon crystal ingot) ภายใต้ความดันประมาณ 1 บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับระบบปลูกผลึกแบบโซคราลสกีที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมาประกอบด้วย

1. ห้องปลูกผลึก (growth chamber)
2. ระบบหล่อเย็น (cooling system)
3. ตัวทำความร้อนและฉนวนกั้นความร้อน (heating element and shield)
4. ระบบก๊าซเฉื่อย (inert-gas system)
5. ระบบปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump system)
6. ระบบหมุนและดึงผลึก (crystal pulling and rotating system)
7. ระบบควบคุมอุณหภูมิ (temperature control system)
8. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (power supply)

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของส่วนประกอบ 6 ส่วน (1-6) ของระบบปลูกผลึกแบบโซคราลสกีที่ได้พัฒนาสร้างขึ้น โดยในส่วนที่ 6 จะกล่าวถึงโครงสร้าง สำหรับการควบคุมจะกล่าวอีกครั้งในบทที่ 4 สำหรับในส่วนประกอบที่ 7 และ 8 จะอธิบายละเอียดในบทที่ 5 ส่วนประกอบ 1-6 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 ห้องปลูกผลึก (growth chamber)

ได้ทำการพัฒนาห้องปลูกผลึกขึ้นมาจากชิ้นส่วนที่มีอยู่เดิมซึ่งเป็นโลหะสเตนเลส (Stianless Steel) ลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกแนวนอน มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร มีความลึก 20 เซนติเมตร และยังมีส่วนประกอบที่ยื่นออกมาจากตัวมีลักษณะเป็นปล่องคอทั้งหมด 4 ปล่อง โดยอยู่ที่ด้านบนและด้านล่างอย่างละ 1 ปล่อง ด้านข้างซ้าย 1 ปล่อง ด้านข้างขวา 1 ปล่อง และมีฝาประกบทั้ง 4 ด้านเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับส่วนอื่น ๆ ของระบบ ได้แก่

ด้านบน เป็นส่วนที่ต่อเข้ากับส่วนของระบบหมุนและดึงผลึก โดยมีช่องเล็ก ๆ ให้แท่งควอทซ์ซึ่งเป็นแกนดึงและหมุนผลึกผ่านเข้ามาได้ และตรงส่วนปล่องคอด้านบนนี้มีข้อต่อซึ่งเป็นทางเข้าของก๊าซอาร์กอนโดยมีวาล์ว (valve) ชนิดพิเศษสำหรับเปิด-ปิด ก๊าซประกอบอยู่ด้วย

ด้านข้างซ้าย มีฝาประกบซึ่งกลึงส่วนของข้อต่อให้มีช่องเล็ก ๆ เพื่อให้แท่งเทอร์โมคับเปิล (thermocouple) ผ่านเข้ามาได้ สำหรับจะใช้วัดอุณหภูมิทางด้านข้างของตัวทำความร้อน เป็นชนิดพลาตินัม-โรเดียม (ดูช่วงที่ใช้วัดในตารางที่ 3.1 หน้า 39)

ด้านข้างขวา มีฝาประกบซึ่งกลึงส่วนของข้อต่อให้เชื่อมเข้ากับเกจวัดความดันบรรยากาศภายในห้องปลูกผลึก

ด้านล่าง มีฝาประกบที่ออกแบบให้ทำหน้าที่เป็นฐานรองตัวทำความร้อนและฉนวนกั้นความร้อน พร้อมทั้งเป็นที่ตั้งของขั้วไฟฟ้ากระแสสูง ฝาด้านนี้ทำเป็นสเตนเลสสองชั้น คือด้านในกลวงเพื่อใช้ในการหล่อเย็น ตรงส่วนปล่องคอมีข้อต่อซึ่งเป็นทางออกของก๊าซอาร์กอน โดยมีวาล์วเปิด-ปิด ประกอบอยู่ด้วย ฝาด้านล่างนี้จึงมีความยากลำบากในการออกแบบและสร้างขึ้นมาเพราะเป็นส่วนสำคัญของระบบ และเป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายความร้อนด้วย

ทั้ง 4 ฝาดังที่กล่าวมาแล้ว จะมีลักษณะเป็นแผ่นกลม และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 19.6 เซนติเมตร มีความหนา 1 เซนติเมตร ยกเว้นฝาด้านล่างที่มีความหนา 2 เซนติเมตร* (*ดูแบบแปลนในภาคผนวก ข.)

ด้านหน้า ไม่มีลักษณะเป็นปล่องคอยื่นออกมา แต่จะมีฝาประกบกับตัวห้องปลูกผลึก ฝาด้านหน้าออกแบบและสร้างให้เป็นสเตนเลสสองชั้น ด้านในกลวงเพื่อใช้ในการหล่อเย็นเช่นเดียวกับฝาด้านล่าง ฝาด้านหน้านี้มีลักษณะเป็นแผ่นกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 30.6 เซนติเมตร มีความหนา 3 เซนติเมตร ฝาด้านนี้ออกแบบให้มีช่อง (window) เพื่อมองเข้าไปเห็นด้านในห้องปลูกผลึก โดยช่องมองจะทำมุมพอดีกับบริเวณที่ทำการปลูกผลึกและใช้กระจกชนิดพิเศษที่ทนความร้อนสูง และยังได้ออกแบบฝาด้านนี้ให้เปิด-ปิด ได้สะดวกด้วยการติดบานพับเพราะฝาด้านนี้ทำการเปิด-ปิด มากกว่าฝาด้านอื่น ๆ** (**ดูแบบแปลนในภาคผนวก ข.)

ด้านหลังของห้องปลูกผลึกต่อเข้ากับส่วนของระบบปั๊มสุญญากาศ และทุก ๆ ฝาที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดจะมียางวงกลม (o-ring) รองรับอยู่ในร่องก่อนประกบฝาทั้งหมดเข้ากับตัวห้องปลูกผลึก เพื่อป้องกันการรั่วซึมของอากาศ ซึ่งได้ออกแบบกลึงร่องเอาไว้บนปากปล่องของปล่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านบน ด้านล่าง ด้านข้างทั้งสอง และบนตัวห้องปลูกผลึกสำหรับฝาด้านหน้า ลักษณะของห้องปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้นมาเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.1

จากนั้นได้ทำการออกแบบและสร้างฐานเพื่อรองรับห้องปลูกผลึก ใช้วัสดุที่เป็นเหล็กชุบโครเมียม โดยมีส่วนที่รองรับตามรัศมีส่วนโค้งของห้องปลูกผลึกทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ทั้งยังออกแบบให้มีที่ล็อก (lock) ประกบส่วนบนห้องปลูกผลึกด้านหน้าเพื่อไม่ให้ตัวห้องปลูกผลึกเกิดการคลาดเคลื่อนได้ เพราะห้องปลูกผลึกมีรูปทรงที่เป็นทรงกระบอกค่อนข้างกลม ซึ่งทั้งห้องปลูกผลึกและฐานรองดังกล่าวจะตั้งอยู่บนโครงเหล็กที่ออกแบบขึ้นมาเพื่อใช้เป็นที่ตั้งของเตาปลูกผลึกและส่วนอื่น ๆ ของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โครงเหล็กนั้นออกแบบให้มีการปรับระดับสูงต่ำได้ เพื่อใช้ในกรณีที่ต้องการปรับระดับให้พอดีเมื่อประกบห้องปลูกผลึกเข้ากับระบบปั๊มสุญญากาศ

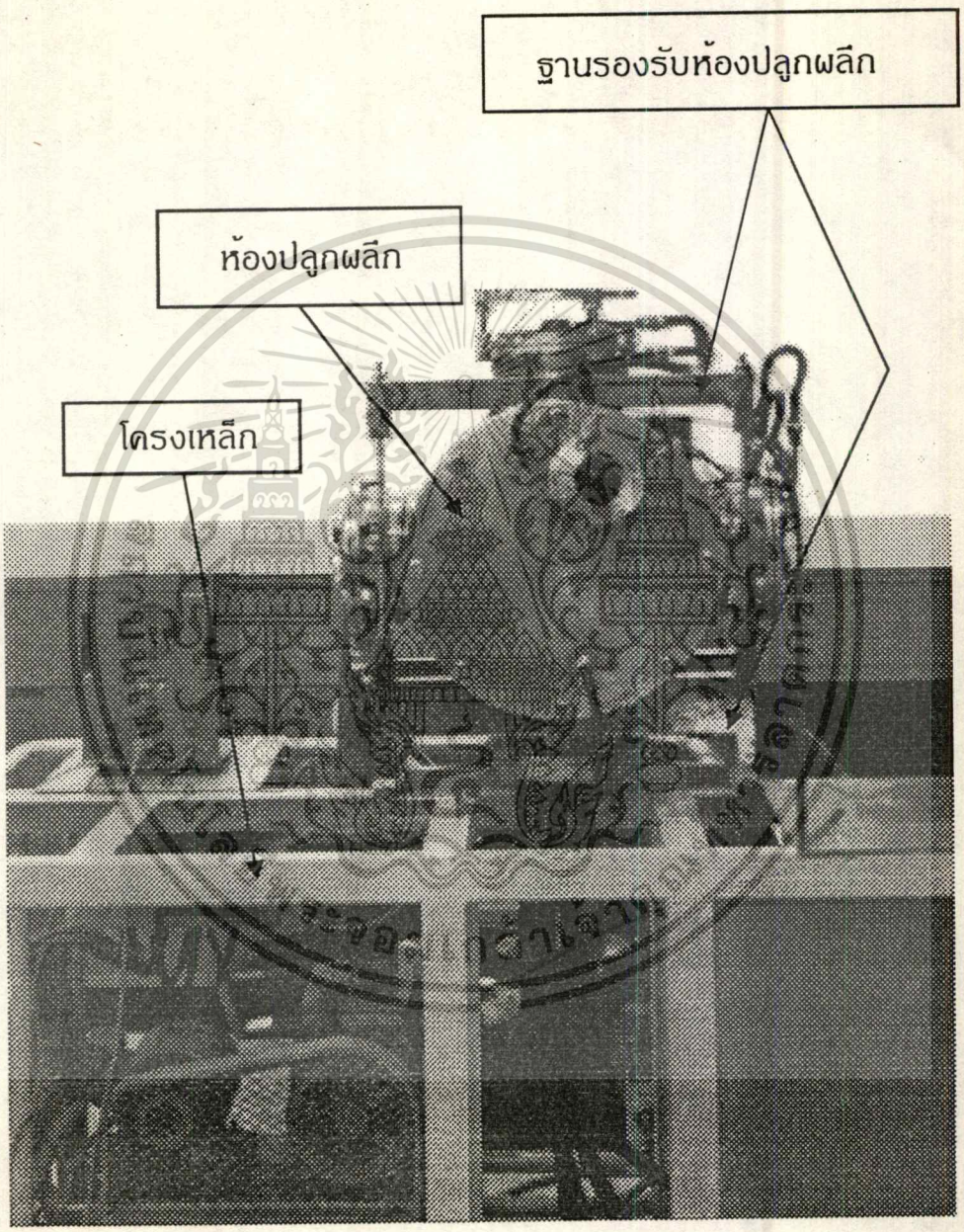
ฐานรองห้องปลูกผลึกเป็นเหล็กชุบโครเมียม กว้าง 22 เซนติเมตร ยาว 44.5 เซนติ-เมตร และสูง 51 เซนติเมตร

โครงเหล็ก กว้าง 45 เซนติเมตร ยาว 170 เซนติเมตร และสูง 71 เซนติเมตร ปรับระดับได้ในระยะ 9 เซนติเมตร

3.1.1 การดำเนินการสร้าง

ออกแบบห้องปลูกผลึกใหม่และปรับปรุงสร้างจากห้องปลูกผลึกที่มีอยู่เดิม โดยเปลี่ยนฝาด้านหน้า เปลี่ยนฝาด้านล่าง เพิ่มส่วนข้อต่อต่าง ๆ จากนั้นออกแบบและสร้างฐานรองห้องปลูกผลึก โครงเหล็ก สุดท้ายประกอบและติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

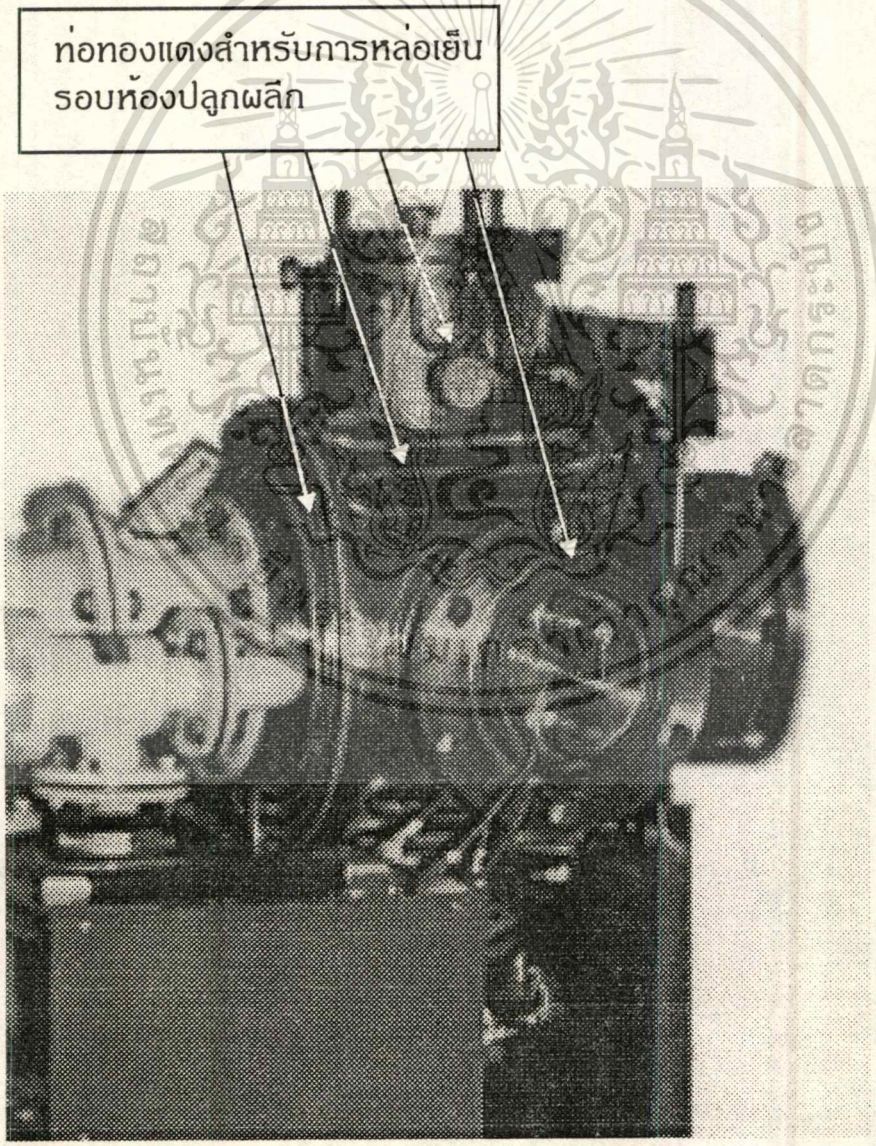


รูปที่ 3.1 แสดงห้องปลูกผลึก ฐานรองห้องปลูกผลึกและโครงเหล็กที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ระบบหล่อเย็น (cooling system)

ได้ออกแบบให้เป็นการหล่อเย็นด้วยน้ำ โดยส่งผ่านเข้าไปในท่อทองแดงที่วนไปมาตลอดทั้งตัวของห้องปลูกผลึก ฝาด้านบน ฝาด้านข้างซ้าย และฝาด้านข้างขวา โดยพยายามออกแบบให้การเดินท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1/4 นิ้ว ครอบคลุมผ่านพื้นที่ให้มากที่สุด สำหรับฝาด้านหน้ากับฝาด้านล่างทำเป็นฝาสเตนเลสสองชั้นดังที่กล่าวมาแล้ว โดยมีทางน้ำเข้าและทางน้ำออกจากทุก ๆ ฝา รวมทั้งรอบ ๆ ตัวห้องปลูกผลึก เนื่องจากได้ใช้วิธีการหล่อเย็นด้วยน้ำที่ออกมาจากก๊อกโดยตรงแล้วไหลเวียนผ่านรอบ ๆ ห้องปลูกผลึกแล้วปล่อยน้ำนั้นทิ้งไปเลย (ไม่มีการนำน้ำที่เข้าไปหล่อเย็นแล้วกลับมาไหลเวียนอีก) ดังนั้นจึงได้ออกแบบระบบการไหลของน้ำออกเป็นสามทางเดิน โดยทำแผงควบคุมวาล์วน้ำทั้งน้ำเข้าและน้ำออก ในรูปที่ 3.2 แสดงทางเดินน้ำตามท่อทองแดงที่ขดไปมารอบห้องปลูกผลึก



รูปที่ 3.2 แสดงการหล่อเย็นรอบตัวห้องปลูกผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางเดินน้ำที่หนึ่ง

น้ำไหลออกจากก๊อกเป็นขาเข้า ไปยังขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นแท่งทองแดงอันที่หนึ่ง น้ำที่ออกจากขั้วไฟฟ้าอันที่หนึ่งจะผ่านไปยังสายยางอ่อนสีดำยาวประมาณ 5 เมตร เป็นการเพิ่มความต้านทานเพื่อลดประจุไฟฟ้าในน้ำที่ผ่านขั้วไฟฟ้าออกมา ไหลออกแล้วเข้าไปยังขั้วไฟฟ้าอันที่สอง ขั้วไฟฟ้าทองแดงทั้งสองอันนี้เป็นแท่งกลมกลวงด้านในเพื่อใช้ในการหล่อเย็น จากนั้นจึงไหลเข้าไปในแท่งสเตนเลสซึ่งทำหน้าที่เป็นขารองฉนวนกั้นความร้อนอันที่หนึ่ง ออกจากขารองอันที่หนึ่งก็ไหลเข้าไปในขารองฉนวนอันที่สอง แท่งสเตนเลสที่เป็นขารองฉนวนทั้งสองอันนี้เป็นแท่งกลมกลวงเช่นเดียวกับแท่งทองแดงที่เป็นขั้วไฟฟ้า เมื่อน้ำผ่านออกจากขารองฉนวนอันที่สองแล้วก็จะไหลไปยังทางน้ำเข้าของฝาด้านล่างแล้วไหลออก จากนั้นก็ไหลเวียนเข้าสู่ทางน้ำเข้าของฝาด้านหน้า เสร็จแล้วก็ไหลออกไปยังวาล์วน้ำขาออก (วาล์วน้ำขาออกที่ 1)

ทางเดินน้ำที่สอง

น้ำไหลออกจากวาล์วน้ำขาเข้าสู่ทางน้ำเข้าที่ตัวห้องปลูกผลึกไหลเวียนจากปล่องคอด้านขวาไปรอบ ๆ ตัวห้องปลูกผลึกทั้งหมด แล้วไหลออกไปยังวาล์วขาออก (วาล์วน้ำขาออกที่ 2)

ทางเดินน้ำที่สาม

ทางเดินน้ำที่สามนี้จะเป็นทางเดินน้ำที่ไหลเวียนเฉพาะที่ฝาเท่านั้น โดยเริ่มจากน้ำไหลออกจากวาล์วขาเข้าสู่ทางน้ำเข้าที่ฝาด้านข้างขวา ออกจากฝาด้านนี้ก็เข้าสู่ฝาด้านบน ไหลออกจากฝาด้านบนเข้าสู่ทางน้ำเข้าที่ฝาด้านข้างซ้าย จากนั้นก็ไหลออกไปยังวาล์วขาออก (วาล์วน้ำขาออกที่ 3)

การเชื่อมต่อทางเดินน้ำระหว่างฝาทั้งหมดกับตัวห้องปลูกผลึกนั้นใช้สายยางอ่อนสีดำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1/4 นิ้ว โดยระหว่างปลายท่อทองแดงที่ขดไปมากับปลายสายยางจะใช้ข้อต่อทองเหลืองที่มีปลายด้านหนึ่งสามารถต่อท่อทองแดงขนาด 1/4 นิ้ว และอีกปลายด้านหนึ่งเป็นท่อหด หรือที่เรียกกันว่า "หางหนู" เพื่อเอาสายยางขนาด 1/4 นิ้วดังกล่าวมาสวมได้ ดังนั้นในการเลือกข้อต่อทองเหลืองจึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับชนิดและขนาดของสิ่งที่จะใช้ต่อกันด้วย

แผงควบคุมวาล์วน้ำนี้ สามารถใช้ได้กับน้ำที่จะออกมาจากตัวทำความเย็น (cooler) ถ้าหากว่ามีตัวทำความเย็นที่มีกำลังและมีที่เก็บน้ำเพียงพอที่จะหล่อเย็นระบบได้

3.2.1 การดำเนินการ

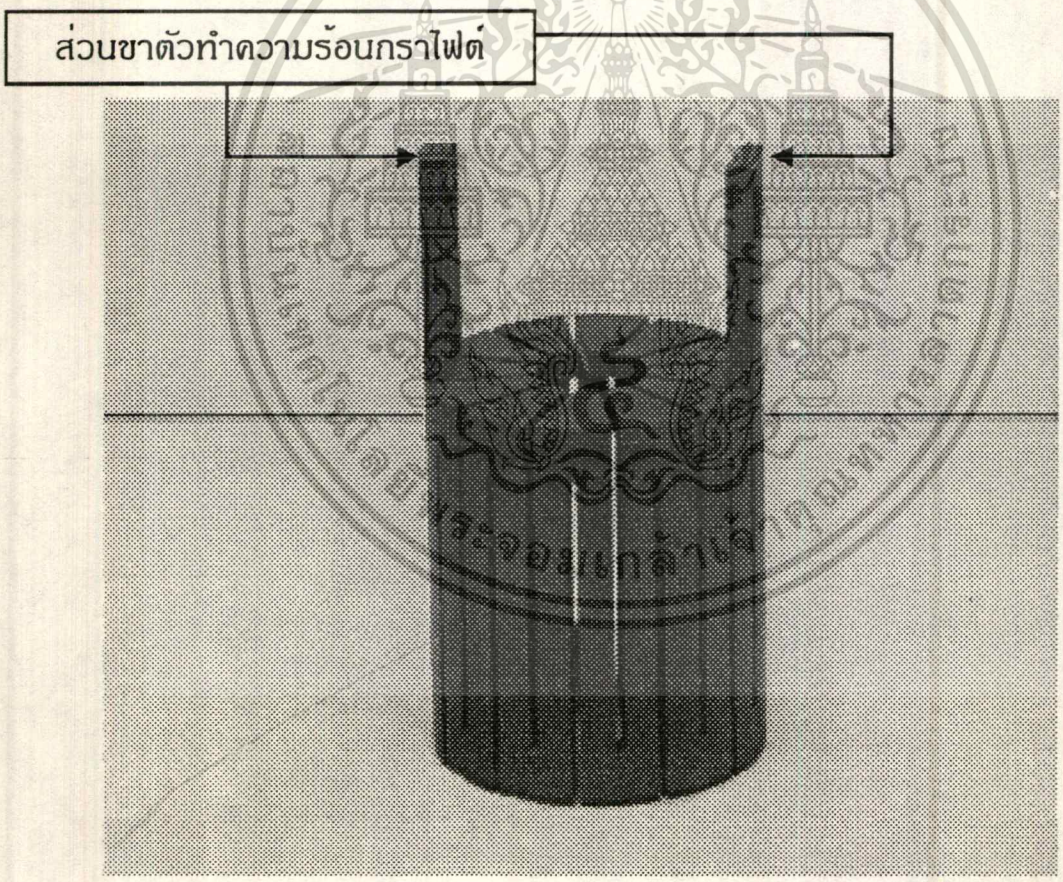
ออกแบบและทำทางเดินน้ำบนตัวห้องปลูกผลึก ฝาด้านบน ฝาด้านล่าง ฝาด้านข้างและฝาด้านหน้า โดยจัดหาท่อทองแดงขนาดที่เหมาะสมและพยายามให้ครอบคลุมพื้นที่ผิวของส่วนดังกล่าวให้มากที่สุด หาสายยางอ่อนสีดำที่สามารถงอโค้งได้โดยไม่ตีบตัน การใช้สายยางอ่อนสีดำก็เนื่องจากป้องกันการเกิดตะไคร่น้ำในสายยาง หาข้อต่อทองเหลืองที่เหมาะสมกับท่อทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แดงและสายยาง ทำแผงควบคุมวาล์วน้ำ ต่อน้ำเข้าและน้ำออกให้กับระบบปั๊มสุญญากาศ และสุดท้ายทดสอบการไหลเวียนของน้ำทั้งระบบ

3.3 ตัวทำความร้อนและฉนวนกั้นความร้อน (heating element and shield)

สำหรับตัวทำความร้อนและฉนวนกั้นความร้อนนี้ เป็นตัวทำความร้อนและฉนวนที่เป็นกราไฟต์ (graphite) ที่มีความบริสุทธิ์สูง มีค่าความต้านทาน (resistance) ถูกต้องแม่นยำสูง ค่าความต้านทานของตัวทำความร้อนที่สั่งทำมานี้มีค่าเท่ากับ 160 มิลลิโอห์ม (mΩ) โดยมีจุดหลอมเหลวของกราไฟต์มากกว่า 2000 องศาเซลเซียส ลักษณะของตัวทำความร้อนกราไฟต์แสดงดังในรูปที่ 3.3 ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 63.50 มิลลิเมตร สูง 139.70 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 76.90 มิลลิเมตร* (*ดูแบบแปลนในภาคผนวก ข.)

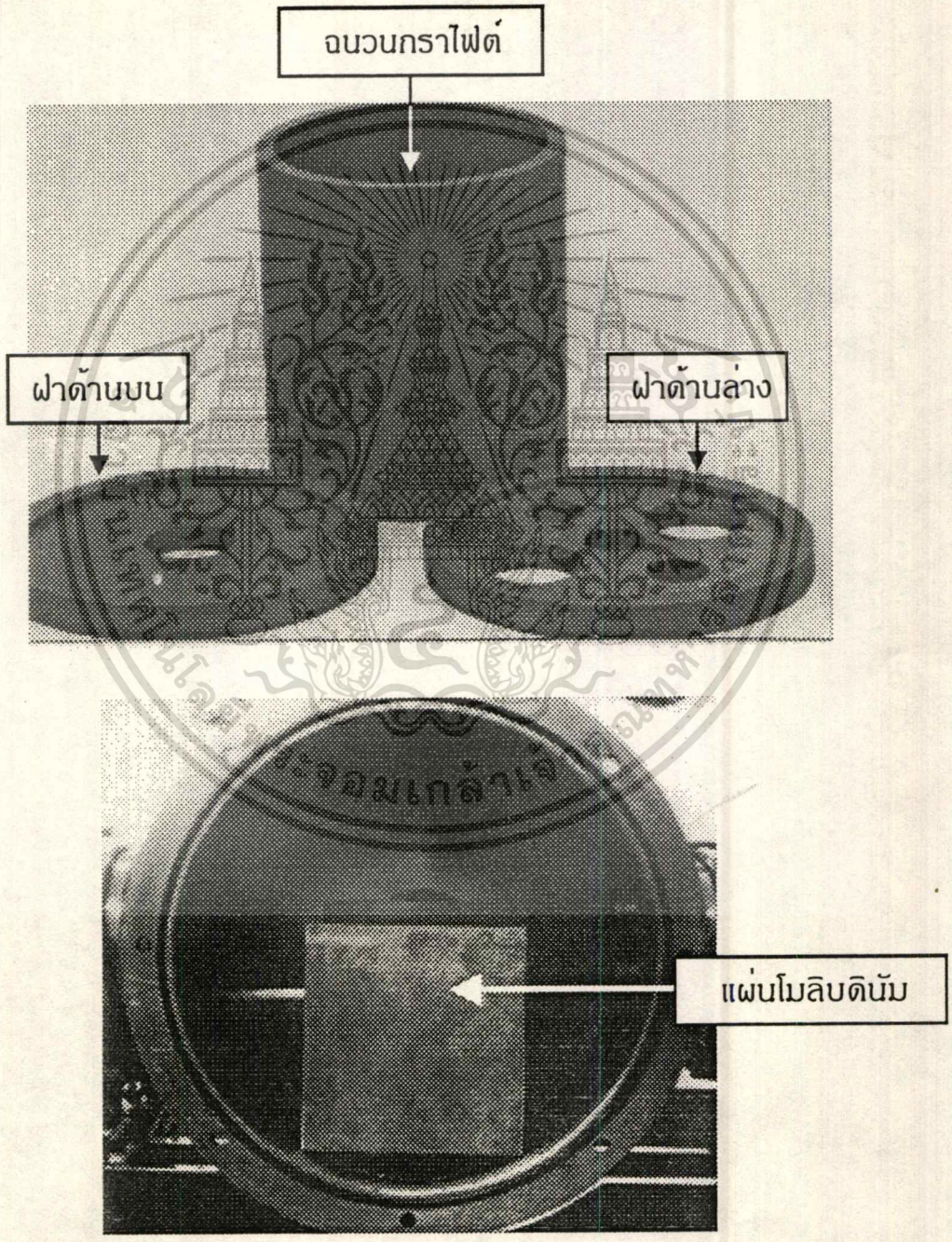


รูปที่ 3.3 แสดงตัวทำความร้อนกราไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับฉนวนกั้นความร้อน* จะประกอบไปด้วยสองชั้นคือชั้นในเป็นฉนวนที่เป็นกราไฟต์มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกมีฝาประกบด้านบน มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 101.6 มิลลิเมตร สูง 146.34 มิลลิเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 114.3 มิลลิเมตร (* ดูแบบแปลนในภาคผนวก ข.)

ชั้นที่สองเป็นฉนวนซึ่งเป็นแผ่นโมลิบดินัม (molybdenum) เพื่อทำหน้าที่สะท้อนรังสีความร้อน โดยจะทำเป็นลักษณะของกล่องสี่เหลี่ยม กว้าง 120 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตรและสูง 150 มิลลิเมตร ในรูปที่ 3.4 แสดงลักษณะฉนวนกั้นความร้อนกราไฟต์และแผ่นโมลิบดินัม



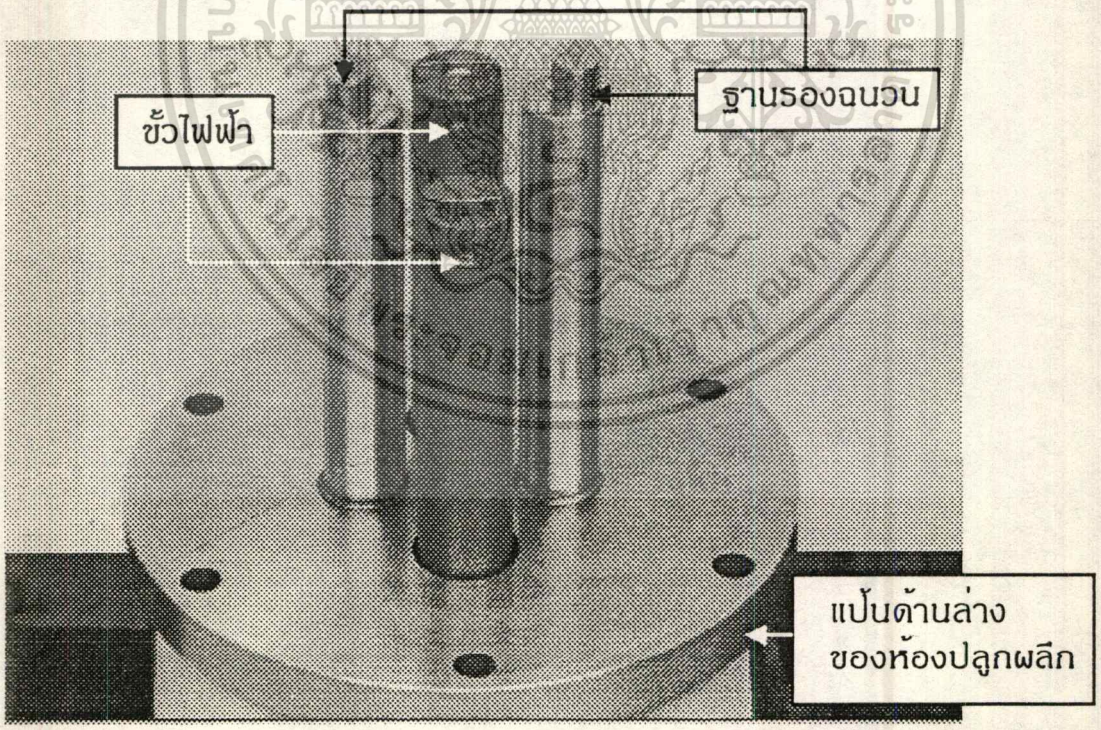
รูปที่ 3.4 แสดงฉนวนกั้นความร้อนกราไฟต์และแผ่นโมลิบดินัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่นำกระแสไฟฟ้ามายังตัวทำความร้อนหรือขั้วไฟฟ้าได้ทำเป็นแท่งทองแดงสองแท่ง มีความยาว 178 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 22 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 28 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีด้านในกลวงเพื่อใช้ในการหล่อเย็นดังที่กล่าวมาแล้ว แท่งทองแดงนั้นนอกจากจะเป็นส่วนนำกระแสหรือขั้วไฟฟ้าแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นฐานรองตัวทำความร้อนอีกด้วย โดยส่วนพื้นที่หน้าตัดของแท่งทองแดงจะทำรอยบากตามรัศมีโค้งของขาของตัวทำความร้อน และยึดน็อตเพื่อกันความคลาดเคลื่อนและลดช่องว่างระหว่างขาของตัวทำความร้อนกราไฟต์กับขั้วไฟฟ้าเพื่อให้มีผิวสัมผัสที่ดี พื้นที่หน้าตัดด้านล่างของขั้วไฟฟ้ามีส่วนของท่อน้ำเข้า-ออก (ดูแบบแปลนในภาคผนวก ข.)

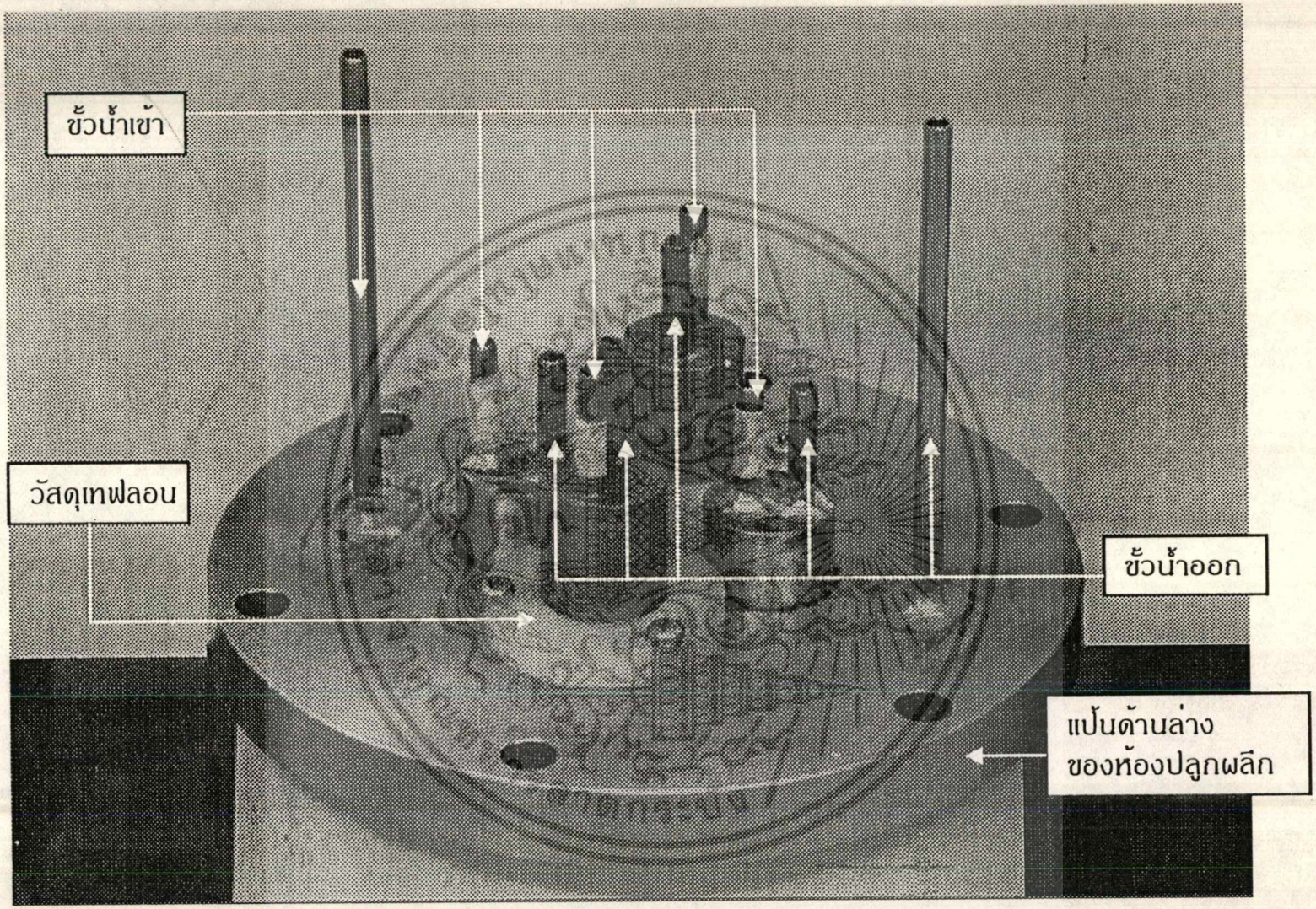
ส่วนของฐานรองฉนวนที่เป็นกราไฟต์ ได้ทำเป็นแท่งสเตนเลสสองแท่ง โดยมีความยาว 170 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 18 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 24 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกด้านในกลวงเช่นเดียวกับแท่งทองแดง พื้นที่หน้าตัดด้านบนทำเป็นส่วนรองรับตามรัศมีความโค้งของตัวฉนวนกราไฟต์* พื้นที่หน้าตัดด้านล่างมีส่วนของท่อน้ำเข้า-ออก ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (* ดูแบบแปลนในภาคผนวก ข.)

รูปที่ 3.6-3.9 แสดงถึงการประกอบตัวทำความร้อน ฉนวนกั้นความร้อนเข้ากับฐานรองและห้องปลูกผลึก

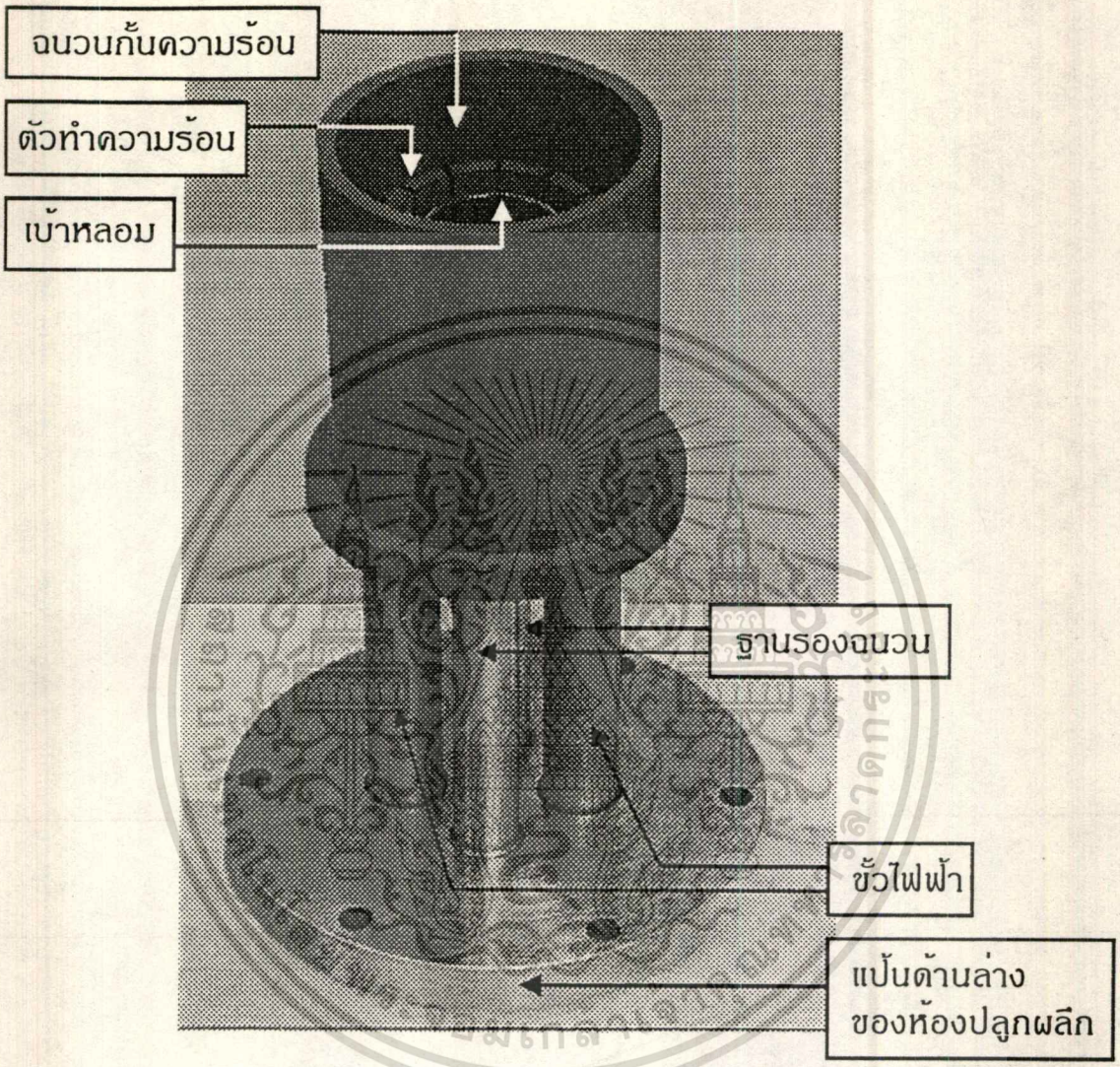


รูปที่ 3.5 แสดงขั้วไฟฟ้าและฐานรองกราไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

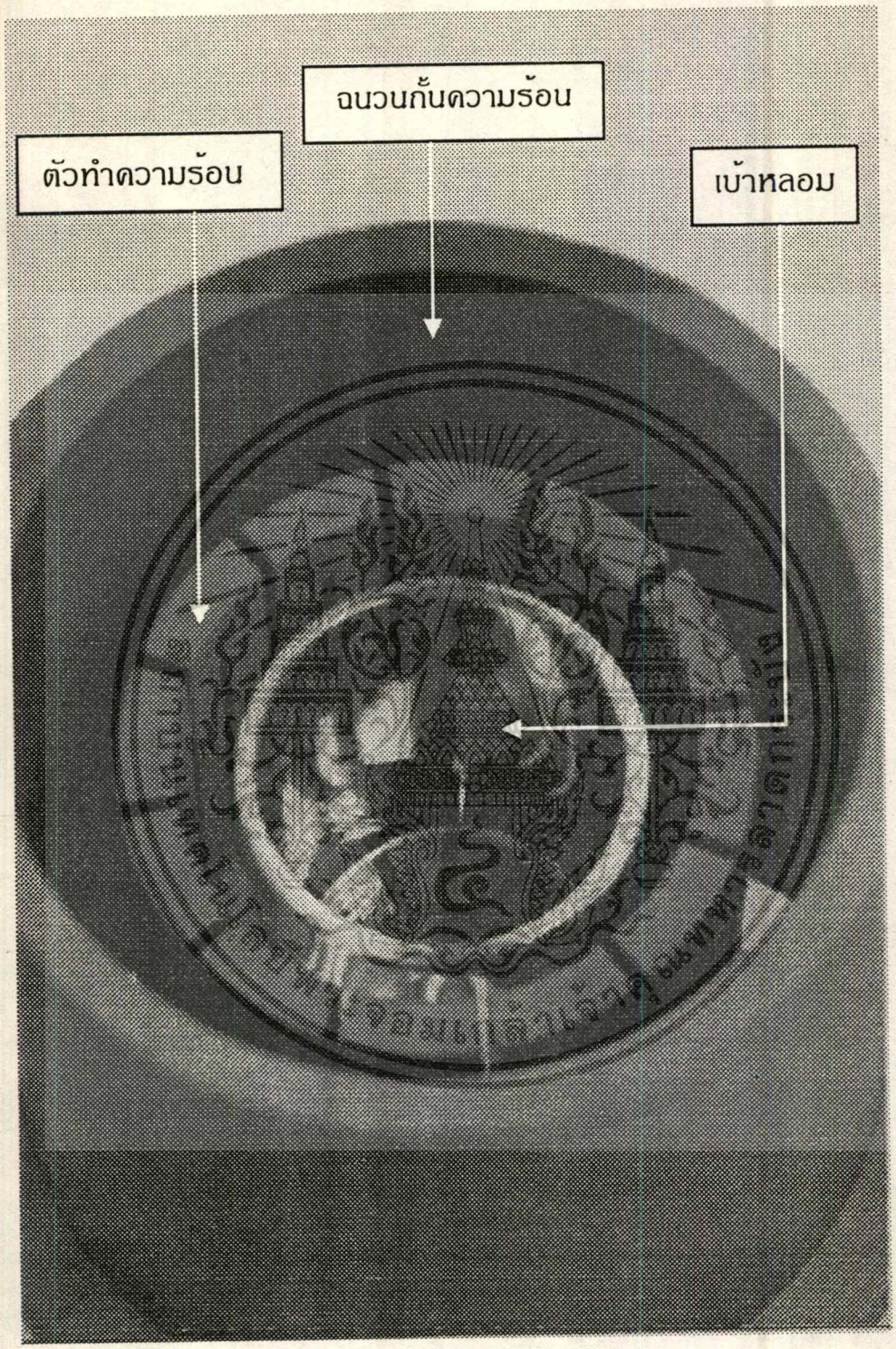


รูปที่ 3.6 แสดงขั้วน้ำเข้า-ออก ของฐานรองตัวทำความร้อน ฐานรองฉนวนกราไฟต์
และแป้นด้านล่างของห้องปลูกผลึก



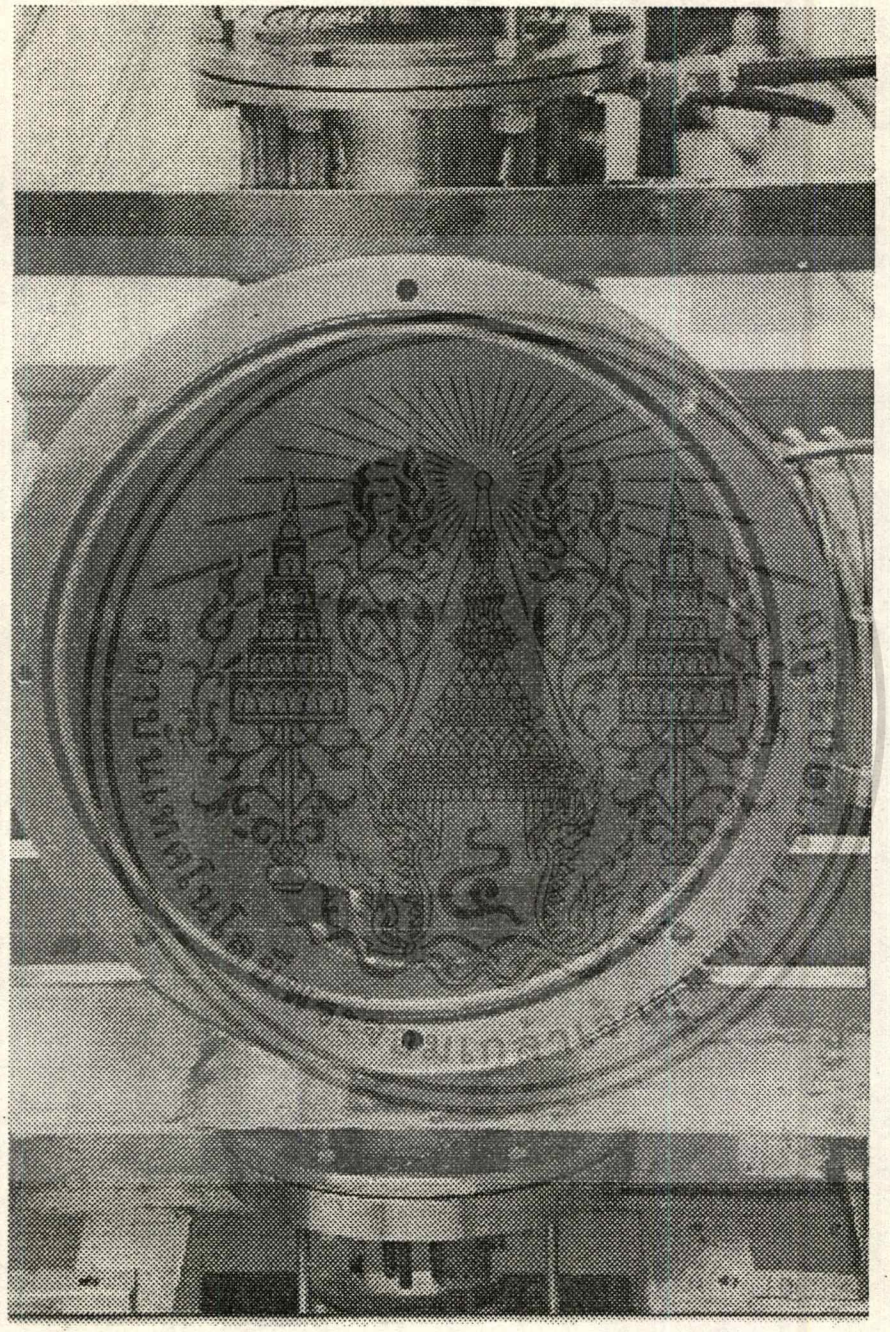
รูป 3.7 แสดงการประกอบตัวทำความร้อนและฉนวนกั้นความร้อนเข้ากับฐานรอง และแป้นด้านล่างของห้องปลูกผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงเบ้าหลอม ตัวทำความร้อน และฉนวนกั้นความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงภายในห้องปลูกผลึกเมื่อประกอบส่วนต่าง ๆ เข้าไปเรียบร้อยแล้ว .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การดำเนินการ

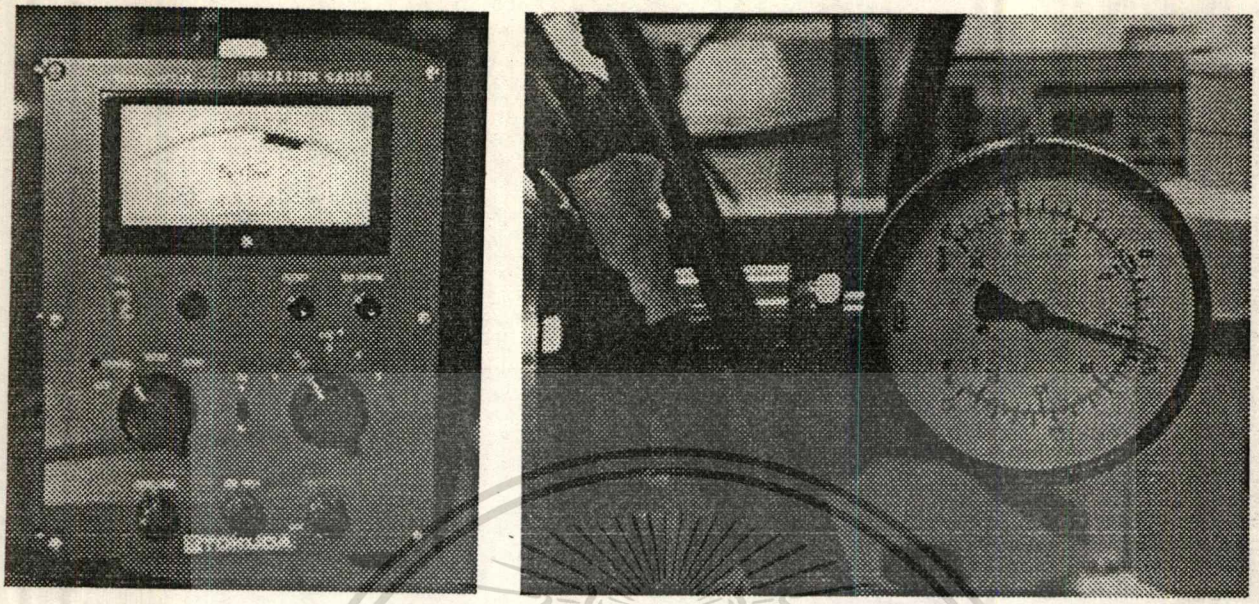
ออกแบบตัวทำความร้อน ฉนวนกั้นความร้อน และสั่งทำตามที่ออกแบบไว้ ออกแบบและสร้างฐานรองฉนวนกราไฟต์ ฐานรองตัวทำความร้อนโดยให้ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้วย เมื่อได้ตัวทำความร้อนและฉนวนมาแล้ว นำมาประกอบเข้ากับฐานรองต่าง ๆ ให้อยู่ภายในห้องปลูกผลึกและหาตำแหน่งที่จะให้เทอร์โมมิเตอร์ทางด้านข้างผ่านเข้ามา เมื่อได้ตำแหน่งที่จะให้เทอร์โมมิเตอร์เข้ามาแล้ว ก็นำฉนวนทั้งที่เป็นกราไฟต์และโมลิบดินัมไปเจาะรูตามตำแหน่งที่ทำเครื่องหมายเอาไว้ด้วยเครื่องเจาะสว่านไฟฟ้า ทั้งนี้ต้องระมัดระวังอย่างมากในการเจาะเพราะกราไฟต์มีความแข็งแต่เปราะและระวังที่จะไม่สัมผัสกราไฟต์ด้วยมือเปล่า ขนาดของรูต้องพอเหมาะกับแท่งเทอร์โมคับเปิลที่จะผ่านเข้ามาเพื่อวัดอุณหภูมิทางด้านข้างของตัวทำความร้อน

3.4 ระบบก๊าซเฉื่อย (Inert-gas system)

ได้ออกแบบและทำข้อต่อให้ก๊าซเข้า-ออก ในที่นี้ใช้ก๊าซอาร์กอน ก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซเฉื่อยซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารใดทำให้ไม่ก่อให้เกิดสิ่งเจือปนขึ้นภายในเตา ที่ข้อต่อทั้งทางก๊าซเข้าและออกจะมีวาล์วเปิด-ปิด โดยเลือกใช้วาล์วชนิดที่ออกแบบเพื่อใช้กับก๊าซโดยเฉพาะ ที่ถังก๊าซอาร์กอนจะมีเกจวัดความดันก๊าซที่ออกมาด้วย ระบบก๊าซเฉื่อยนี้ออกแบบให้ก๊าซเข้าที่ข้อต่อซึ่งอยู่ที่ปล่องคอด้านบนซ้ายของห้องปลูกผลึก และก๊าซออกที่ข้อต่อซึ่งอยู่ที่ปล่องคอด้านล่างขวา ทั้งนี้เพราะว่าก๊าซขาเข้าจะมีความเย็นทำให้อุณหภูมิบริเวณเหนือสารหลอมเหลวเย็นกว่าบริเวณที่หลอมเหลว เพื่อประโยชน์ในการแข็งตัวของผลึก ก๊าซร้อนจะออกจากระบบทางข้อต่อขาออก อย่างไรก็ตามความดันก๊าซรวมภายในห้องปลูกผลึกจะต้องมากกว่าความดันบรรยากาศภายนอกห้องปลูกผลึกเล็กน้อย เพื่อป้องกันมิให้ก๊าซจากภายนอกห้องปลูกผลึกไหลเข้าไปในระบบทางข้อต่อก๊าซขาออกได้ ดูรูปที่ 3.10

ดังนั้นเพื่อที่จะทราบค่าความดันของก๊าซภายในห้องปลูกผลึก (ในขณะที่มีการปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปในระบบแล้ว) จึงได้ติดเกจวัดความดันไว้บริเวณฝาด้านข้างขวาของห้องปลูกผลึก อย่างไรก็ตามเมื่อเปิดระบบปั๊มสุญญากาศ (ในขณะที่ยังไม่มีการปล่อยก๊าซเฉื่อยเข้าไปในระบบ) จนความดันลดลงต่ำ (ลดลงมากกว่า -760 mmHg) โดยสามารถอ่านค่าความดันขณะนั้นได้จากเกจวัดความดันของเครื่องปั๊มสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงเกจวัดต่าง ๆ

3.4.1 การดำเนินการ

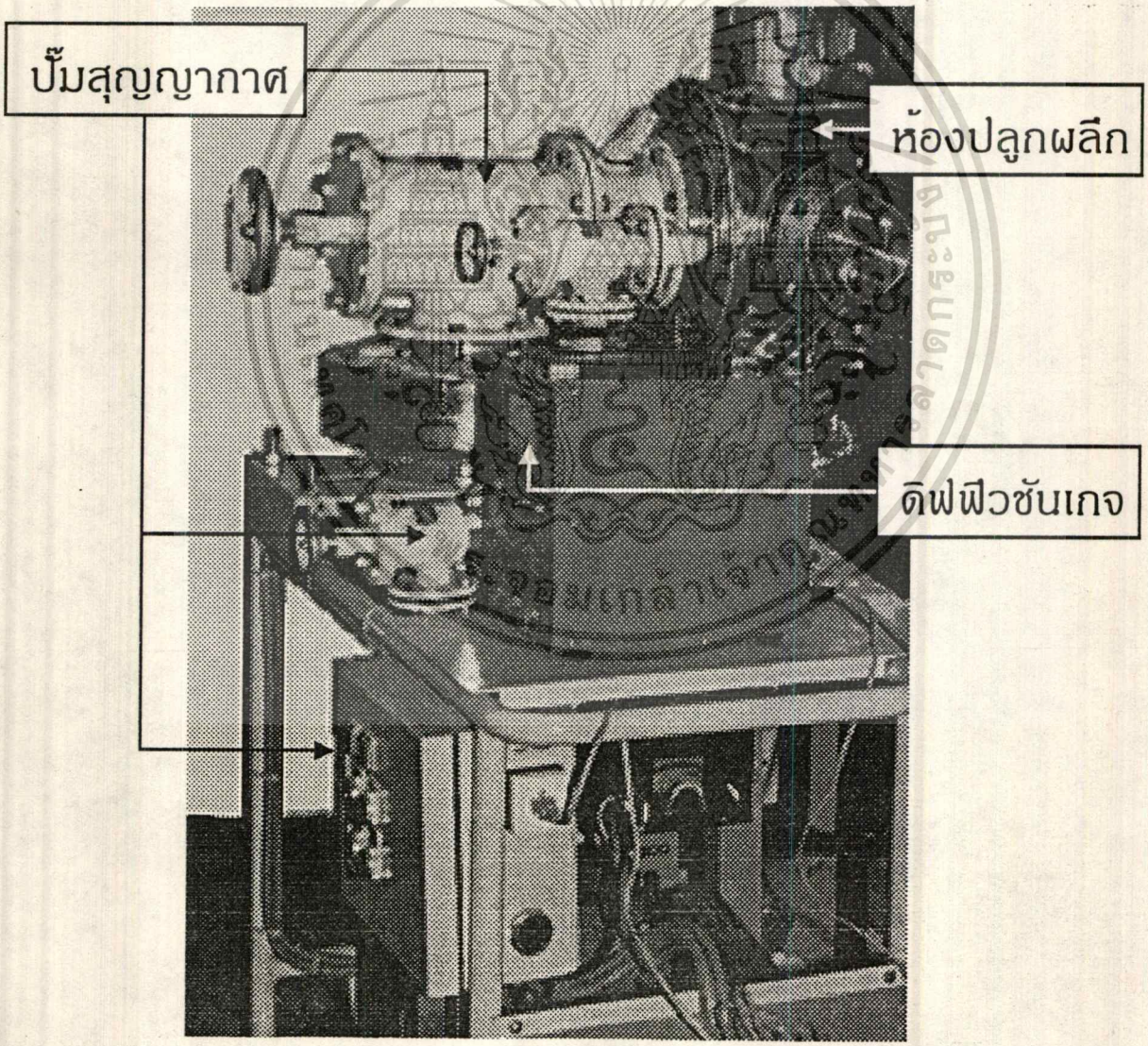
ออกแบบทางเดินก๊าซที่ต้องการให้ไหลผ่าน และทำข้อต่อทางเข้า-ออกของก๊าซ เชื่อมต่อกับห้องปลูกผลึกโดยคำนึงถึงจุดที่ต้องการให้ผลึกเกิดการเย็นตัวลง พร้อมทั้งจัดหาสายก๊าซ วาล์วเปิด-ปิดที่เหมาะสมกับระบบของก๊าซ เกจวัดความดันที่มีสเกลจากสุญญากาศถึงมากกว่าหนึ่งบรรยากาศ ก๊าซอาร์กอน และก่อนเปิดระบบให้ก๊าซไหล ต้องทำการปั๊มให้ภายในห้องปลูกผลึกเป็นสุญญากาศเสียก่อนโดยปิดวาล์วก๊าซทั้งหมด สุดท้ายทดลองเปิดระบบก๊าซและตรวจดูการรั่วซึม แก้ไขรอยรั่วและวัดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ระบบสุญญากาศ (vacuum pump system)

ระบบปั๊มสุญญากาศจะติดตั้งเข้ากับด้านหลังของห้องปลูกผลึกเพื่อสูบอากาศออก การปั๊มเป็นสุญญากาศจะกระทำก่อนที่จะปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไป โดยเมื่อติดตั้งตัวทำความร้อน ฉนวนกั้นความร้อน เบ้าหลอม และส่วนประกอบอื่น ๆ ทั้งหมดของระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกีแล้ว จึงทำการเปิดระบบปั๊มสุญญากาศ ปั๊มสุญญากาศจะมีสองระบบคือโรตารีปั๊ม (rotary pump) และดิฟฟิวชันปั๊ม (diffusion pump) ในการปั๊มให้ระบบปิดเป็นสุญญากาศได้นั้นจะต้องมีการซีล (shield) ห้องปลูกผลึกและทุก ๆ ข้อต่อที่เชื่อมต่อกับห้องปลูกผลึกไว้เป็นอย่างดี

โรตารีปั๊มทำหน้าที่ปั๊มอากาศจากที่ความดันบรรยากาศลงไปจนถึงประมาณ 10^{-3} ทอร์ จากนั้นเปิดดิฟฟิวชันปั๊มให้ทำหน้าที่ปั๊มต่อไปจนถึงประมาณ 10^{-6} ทอร์ สำหรับดิฟฟิวชันปั๊มต้องมีการหล่อเย็นด้วยน้ำจากเครื่องทำความเย็น รูปที่ 3.11 แสดงระบบปั๊มสุญญากาศ



รูปที่ 3.11 แสดงระบบปั๊มสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

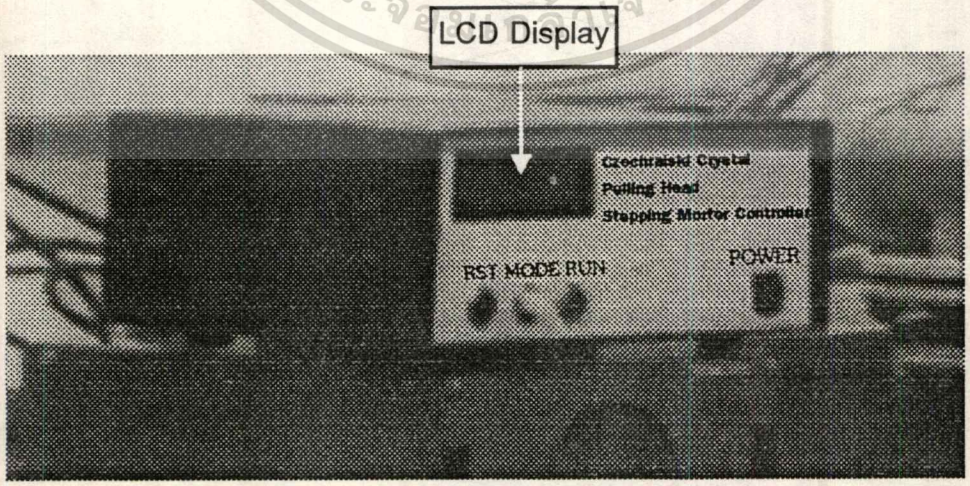
3.5.1 การดำเนินการ

ต่อระบบปั๊มสุญญากาศเข้ากับห้องปลูกผลึกที่ได้ประกอบทุกส่วนไว้เรียบร้อยแล้ว เปิดโรตารีปั๊ม จนกระทั่งความดันภายในห้องปลูกผลึกลดลงต่ำกว่า -760 มิลลิเมตรปรอท (mmHg) โดยจะสังเกตเห็นเข็มของเกจวัดความดันที่ด้านข้างของห้องปลูกผลึกตกลงมาต่ำสุด เปิดดิฟฟิวชันปั๊มให้ทำงานเมื่อสามารถใช้โรตารีปั๊มทำให้ระบบเป็นสุญญากาศได้ อ่านค่าความดันภายในห้องปลูกผลึกที่เกจวัดความดันของดิฟฟิวชันปั๊ม

3.6 ระบบการหมุนและดึงผลึก (crystal pulling and rotating system)

ส่วนหัวดึงผลึก (crystal pulling head) เป็นส่วนที่มีความสำคัญมากส่วนหนึ่งสำหรับการปลูกผลึก ในการสร้างจำเป็นที่จะต้องอาศัยความละเอียดสูง เป็นส่วนที่ติดตั้งอยู่ภายนอกของห้องปลูกผลึกแต่มีบางส่วนของส่วนดึงผลึกที่เข้าไปทำงานภายในห้องปลูกผลึก ซึ่งก็หมายถึงแท่งดึงผลึกนั่นเอง ส่วนนี้จะต้องทำงานด้วยความเที่ยงตรงสม่ำเสมอเพราะมีผลกับรูปร่างของผลึกที่จะเกิดขึ้น

สำหรับระบบการหมุนและดึงผลึกนี้ได้ออกแบบให้ทำงานเป็นสองส่วนที่สัมพันธ์กัน นั่นคือส่วนที่ทำงานเกี่ยวกับระบบการดึง (pulling) และส่วนที่ทำงานเกี่ยวกับระบบการหมุน (rotating) ซึ่งทั้งสองส่วนได้ออกแบบให้ใช้สเตปปิ้งมอเตอร์ (stepping motor) สองตัวในการทำงาน โดยมีการ์ด (card) ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรขับมอเตอร์ทั้งสองตัวหนึ่งการ์ด และมีวงจรควบคุมความเร็วรอบของสเตปปิ้งมอเตอร์ทั้งสอง โดยการโปรแกรมผ่านทางคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถสั่งงานให้หมุนตามที่โปรแกรมไว้ จึงสามารถเลือกความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับการปลูกผลึกที่ต้องการได้ มีการแสดงผลที่หน้าปัดซึ่งเป็น LCD ของส่วนควบคุมมอเตอร์ (stepping motor controller) ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงส่วนควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1 ส่วนโครงสร้างของหัวดึงผลึก

ส่วนโครงสร้างของระบบหมุนและดึงผลึก ส่วนใหญ่ใช้โลหะสเตนเลส ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ ได้แก่ แป้นบน, แป้นล่าง, ขาตั้ง, แท่งเกลียว (ดูรายละเอียดได้ในแบบแปลนในภาคผนวก ข.) และสเตปปิ้งมอเตอร์สองตัวซึ่งได้กล่าวถึงแล้วในตอนก่อนหน้านี้และในภาคผนวก ค.

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างที่ประกอบกันขึ้นมาเป็นส่วนที่ใช้ทำหน้าที่ในการหมุนและดึงผลึกที่ทำการปลูกภายในห้องปลูกผลึก ลักษณะของส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 3.13 รายละเอียดของส่วนประกอบต่าง ๆ จะกล่าวถึงต่อไป

แป้นบน

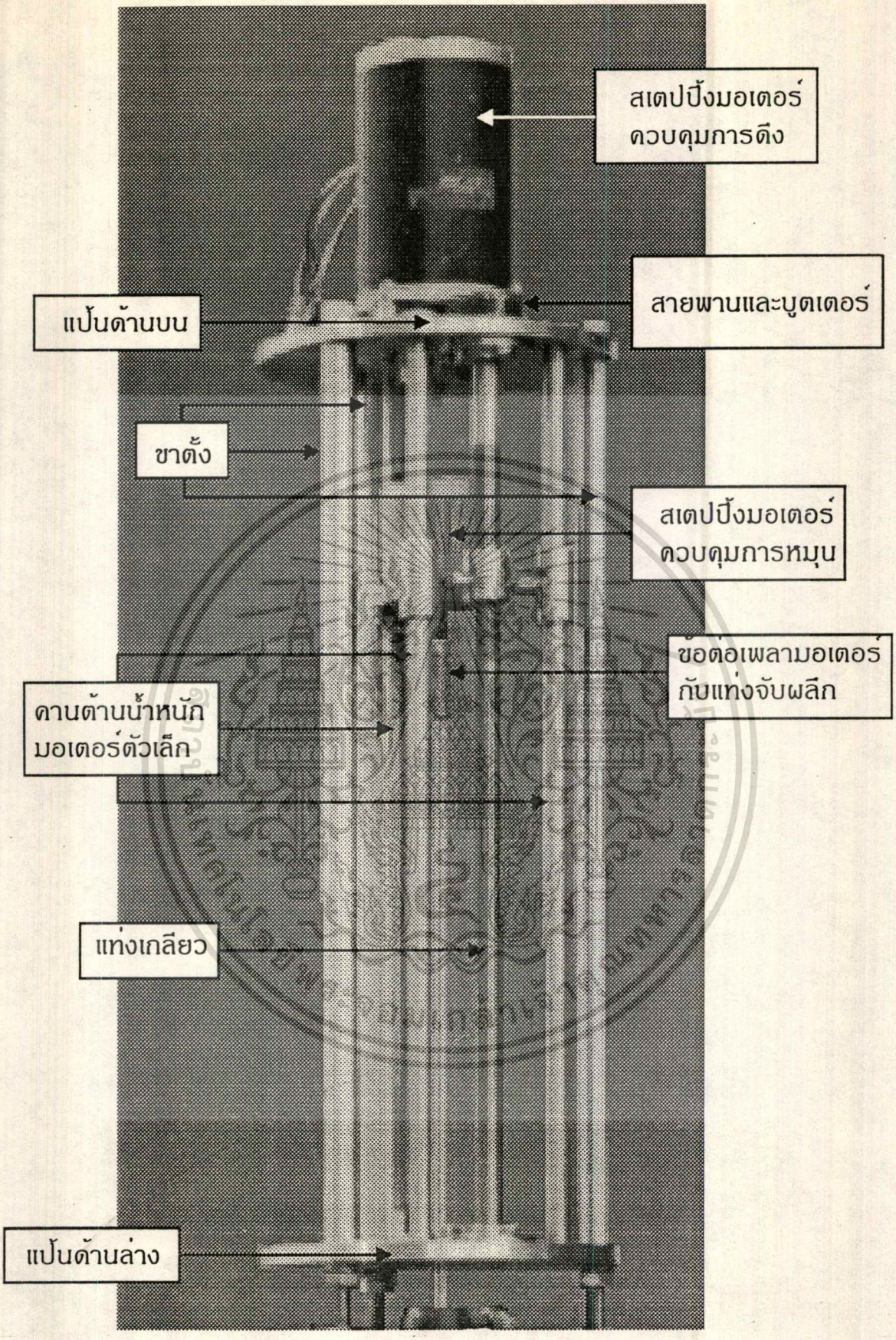
มีลักษณะเป็นแผ่นกลม เส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 196 มิลลิเมตร มีความหนา 10 มิลลิเมตร แป้นด้านบนนี้จะเป็นที่ตั้งของสเตปปิ้งมอเตอร์ตัวที่หนึ่งซึ่งวางอยู่ในแนวคว่ำลง เพลาของมอเตอร์จะผ่านลงมาจากแป้นบนทางช่องกลมที่กลึงเอาไว้ โดยยังมีส่วนของเพลาที่เหลืออยู่ด้านบนแป้นเพื่อทำหน้าที่ในการขับบูตเตอร์ (booter) เพื่อหมุนสายพานไปขับส่วนที่ต่อกับแท่งเกลียวและมีสเตปปิ้งมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่มีเพลายึดอยู่กับแท่งจับผลึกก็จะเคลื่อนที่ขึ้นตามเกลียวนี้ ดังนั้นสเตปปิ้งมอเตอร์ตัวที่หนึ่งนี้จึงทำหน้าที่ ในแนวของการเคลื่อนที่ขึ้น (pullation) ของแท่งจับผลึกในระบบนี้

ส่วนโครงสร้างระหว่างแป้นบนกับแป้นล่าง

ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยสเตปปิ้งมอเตอร์ตัวที่สอง ซึ่งจะวางอยู่บนฐานรองที่มีส่วนเชื่อมต่อกับแท่งเกลียว (ลักษณะเป็นเกลียวตัวผู้) โดยทำเป็นส่วนของเกลียวตัวเมียและเชื่อมต่อกับฐานรองมอเตอร์ตัวที่สอง ส่วนที่เป็นเกลียวตัวเมียนี้จะสวมอยู่บนแท่งเกลียว ด้วยเหตุนี้เองเมื่อสเตปปิ้งมอเตอร์ตัวที่หนึ่งทำงานก็จะทำให้แท่งเกลียวหมุน ซึ่งทำให้สเตปปิ้งมอเตอร์ตัวที่สองเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ตามการหมุนของสเตปปิ้งมอเตอร์ตัวที่หนึ่งเช่นเดียวกัน

สเตปปิ้งมอเตอร์ตัวที่สองจะวางอยู่ในลักษณะคว่ำลงบนฐานรองมอเตอร์ที่ทำขึ้นมา ส่วนเพลาของสเตปปิ้งมอเตอร์ตัวนี้จะยื่นลงมา ได้ออกแบบทำข้อต่อเพื่อเชื่อมเพลาของมอเตอร์เข้ากับแท่งควอทซ์ที่ใช้เป็นแท่งจับผลึก (แท่งควอทซ์นี้จะทำหน้าที่ในการคนสารหลอมเหลวในเบ้าหลอมด้วย) ในการออกแบบข้อต่อจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงวัสดุที่ต้องการเอามาทำงานร่วมกัน ในที่นี้ก็คือเพลาของมอเตอร์ซึ่งเป็นแกนเหล็กกับแท่งควอทซ์ ข้อต่อดังกล่าวจึงมีส่วนที่ใช้ยึดเพลาให้แน่นและส่วนที่ใช้ยึดแท่งควอทซ์ให้อยู่ในแนวเดียวกัน ส่วนของข้อต่อที่ใช้ยึดแท่งควอทซ์จะมียางรองอยู่ก่อนจะบีบยึดให้แน่น ดังนั้นเมื่อสเตปปิ้งมอเตอร์ตัวที่สองทำงาน ก็จะทำให้แท่งควอทซ์ที่ต่ออยู่กับเพลาของมอเตอร์หมุนไปด้วย สเตปปิ้งมอเตอร์ตัวที่สองนี้จึงทำหน้าที่ในแนวการหมุน (rotation) ของแท่งจับผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะของระบบหมุนและดึงผลึกที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

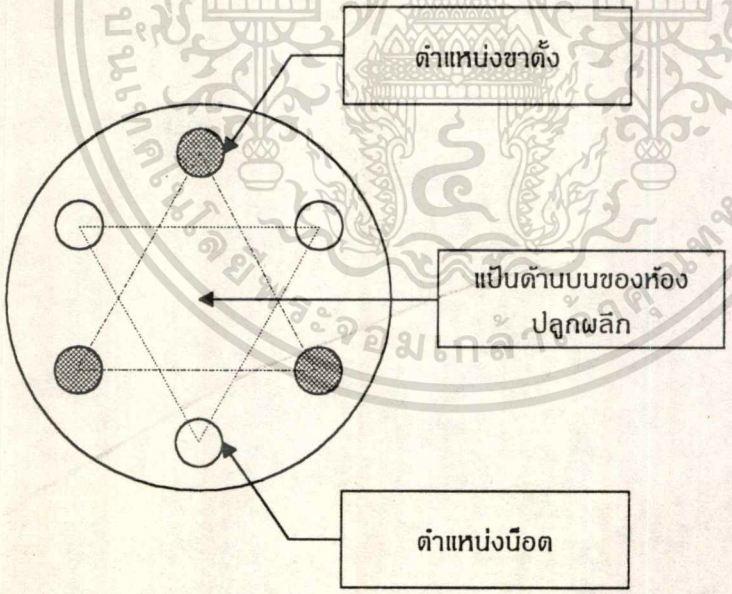
ดังนั้นถ้าสเตปปิ้งมอเตอร์ทั้งสองตัวทำงานพร้อม ๆ กันแล้วก็จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของแท่งจับผลึก ทั้งในแนวการเคลื่อนที่ขึ้นลงและในแนวการหมุน ด้วยอัตราเร็วที่สามารถควบคุมได้ทั้งสองแนวการเคลื่อนที่

ส่วนของแท่งเกลียวจะมีฐานยึดประกบอยู่ ตั้งระหว่างแป้นบนกับแป้นล่างโดยที่ปลายทั้งสองของแท่งเกลียวจะมีตลับลูกปืนช่วยในการเคลื่อนที่ในขณะที่แท่งเกลียวหมุน เพื่อลดแรงเสียดทานและทำให้การเคลื่อนที่ราบเรียบ

แท่งควอทซ์ที่ใช้มีลักษณะเป็นแท่งกลมตัน เส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 6 มิลลิเมตร และยาว 350 มิลลิเมตร ผ่านลงมาจากแป้นล่างของหัวดึงผลึกเข้าไปยังห้องปลูกผลึกถึงส่วนที่เป็นสารหลอมเหลวในเบ้าหลอม

ขาตั้ง

ได้ออกแบบและทำเป็นแท่งกลมตัน เส้นผ่าศูนย์กลาง 190 มิลลิเมตร ยาวทั้งหมด 580 มิลลิเมตร มีด้วยกันทั้งหมดสามขา โดยที่ส่วนปลายของขาทั้งสามจะมีลักษณะเป็นเกลียว (เกลียวตัวผู้) ระยะของเกลียวยาว 70 มิลลิเมตร ส่วนที่ไม่เป็นเกลียวจะอยู่ระหว่างแป้นบนกับแป้นล่าง และมีส่วนที่เป็นเกลียวผ่านแป้นล่างลงมาเพื่อใช้ทำหน้าที่เสมือนน็อตในการประกบส่วนทั้งหมดของหัวดึงผลึกเข้ากับแป้นด้านบนของห้องปลูกผลึก (โดยใช้ร่วมกับน็อตอีกสามตัว) ดังแสดง ในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงตำแหน่งขาตั้งทั้งสามของหัวดึงผลึกและน็อตบนแป้นด้านบนของห้องปลูกผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แป้นด้านล่าง

เป็นโลหะสเตนเลสกลมตันมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 196 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร เท่ากับแป้นด้านบน ที่แป้นด้านล่างจะกลึงเป็นช่องกลวงตรงกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 6.5 มิลลิเมตร ช่องนี้มีไว้เพื่อให้แท่งควอทซ์ที่ใช้ในการจับผลึกผ่านลงมาเพื่อเข้าไปยังห้องปลูกผลึก ดังนั้นที่แป้นด้านบนของห้องปลูกผลึกจึงต้องมีข้อต่อที่กลึงเป็นช่องและต้องมียางโอริงเอาไว้เพื่อบีบรัดแท่งควอทซ์ที่ผ่านลงมา ช่องทั้งสองที่ว่านี้จะต้องตรงกันเพื่อให้แท่งควอทซ์ผ่านได้สะดวกและเคลื่อนที่ในแนวตรงตามต้องการ

ส่วนของระบบดึงและหมุนผลึกจะไม่มีการหล่อเย็น เนื่องจากทำงานอยู่ภายนอกเตา และไม่ได้รับความร้อนมากนัก ส่วนของแท่งควอทซ์ที่ใช้ในการจับผลึกซึ่งจะต้องเข้าไปทำงานภายในห้องปลูกผลึกสามารถทนความร้อนที่อุณหภูมิภายในได้ และในการปลูกผลึกจะต้องมีการทำความสะอาดแท่งควอทซ์ดังกล่าวนี้เสียก่อนด้วยสารอะซีโตนเช่นเดียวกับภายในห้องปลูกผลึก และจะต้องไม่สัมผัสแท่งควอทซ์ด้วยมือเปล่าตลอดการปลูกผลึก

3.6.2 การดำเนินการ

ออกแบบและสร้างระบบการหมุนและดึงผลึก อันประกอบไปด้วย แป้นด้านบน แป้นด้านล่าง แกนหมุนและแกนดึงผลึก ข้อต่อและแท่งจับผลึก ทดลองการควบคุมในแนวการหมุนและการดึงขึ้นของสเตปปิ้งมอเตอร์ด้วยวงจรขับและ ET-BOARD Z 80 V.3 นำไปประกอบเข้ากับแป้นด้านบนของห้องปลูกผลึก เปลี่ยนการควบคุมจาก ET-BOARD Z 80 V.3 โดยการทำเป็นส่วนควบคุมมอเตอร์ (stepping motors controller) สุดท้ายแก้ไขส่วนที่บกพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อ	ตัววัดขั้วบวก (positive element)	ตัววัดขั้วลบ (negative element)	ช่วงอุณหภูมิที่วัดได้ (^{o}C)	อุณหภูมิที่จะวัดได้สูงสุด (^{o}C)
พลาตินัม-พลาตินัม-โรเดียม	90%Pt-10%Rh	พลาตินัม	0-1450	1700
พลาตินัม-พลาตินัม-โรเดียม	87%Pt-13%Rh	พลาตินัม	0-1450	1700
โครเมล-อลูเมล	โครเมล (90%Ni-10%Cu)	อลูเมล (94%Ni,3%Al, 1%Si,2%Mn)	-200~1100	1200
เหล็ก-คอนสแตนตัน	เหล็ก	คอนสแตนตัน (55%Cu-45%Ni)	-200~750	1000
ทองแดง-คอนสแตนตัน	ทองแดง	คอนสแตนตัน (55%Cu-45%Ni)	-200~350	600
โครเมล-คอนสแตนตัน	โครเมล (90%Ni-10%Cu)	คอนสแตนตัน (55%Cu-45%Ni)	-100~1000	600

ตารางที่ 3.1 แสดงชนิดของเทอร์โมคัปเปิลและช่วงของการวัดอุณหภูมิ

บทที่ 4

ระบบควบคุมการหมุนและดึงผลึก

ได้ออกแบบและสร้างระบบหมุนและดึงผลึก โดยใช้สเตปปิ้งมอเตอร์สองตัวในการทำงาน และควบคุมโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ (micro proceesor) สเตปปิ้งมอเตอร์ตัวแรกทำหน้าที่ในการหมุนแท่งดึงผลึก ส่วนตัวที่สองทำหน้าที่ดึงแท่งจับผลึกให้เคลื่อนที่ขึ้นมา ทั้งสองส่วนนี้ทำงานสัมพันธ์กัน ระบบหมุนและดึงผลึกที่ทำขึ้นประกอบด้วยส่วนสำคัญดังต่อไปนี้

1.สเตปปิ้งมอเตอร์ (stepping motor)

2.ส่วนโครงสร้างของหัวดึงผลึก (mechanical of crystal pulling head)

3.ส่วนควบคุม (controller)

4.1 สเตปปิ้งมอเตอร์

สเตปปิ้งมอเตอร์* เป็นอุปกรณ์เครื่องกลไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งแปลงสัญญาณดิจิตอลพัลส์ (digital pulse) ไปเป็นการหมุน โดยลักษณะการหมุนหรือการเคลื่อนที่เป็นแบบทีละขั้นตามแต่พัลส์ (pulse) ที่จะป้อนเข้ามา ทำให้ทราบตำแหน่งได้ถูกต้อง ปัจจุบันสเตปปิ้งมอเตอร์มักถูกนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ของระบบคอมพิวเตอร์อย่างแพร่หลายเช่น เครื่องพิมพ์ หรือกลไกส่วนที่ใช้หมุนแผ่นจานแม่เหล็ก หุ่นยนต์ เป็นต้น โดยขนาดของสเตปอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.1 องศา ถึง 30 องศา สเตปปิ้งมอเตอร์มีหลายแบบ ที่ใช้กันส่วนมาก มีอยู่ 3 ชนิดคือ

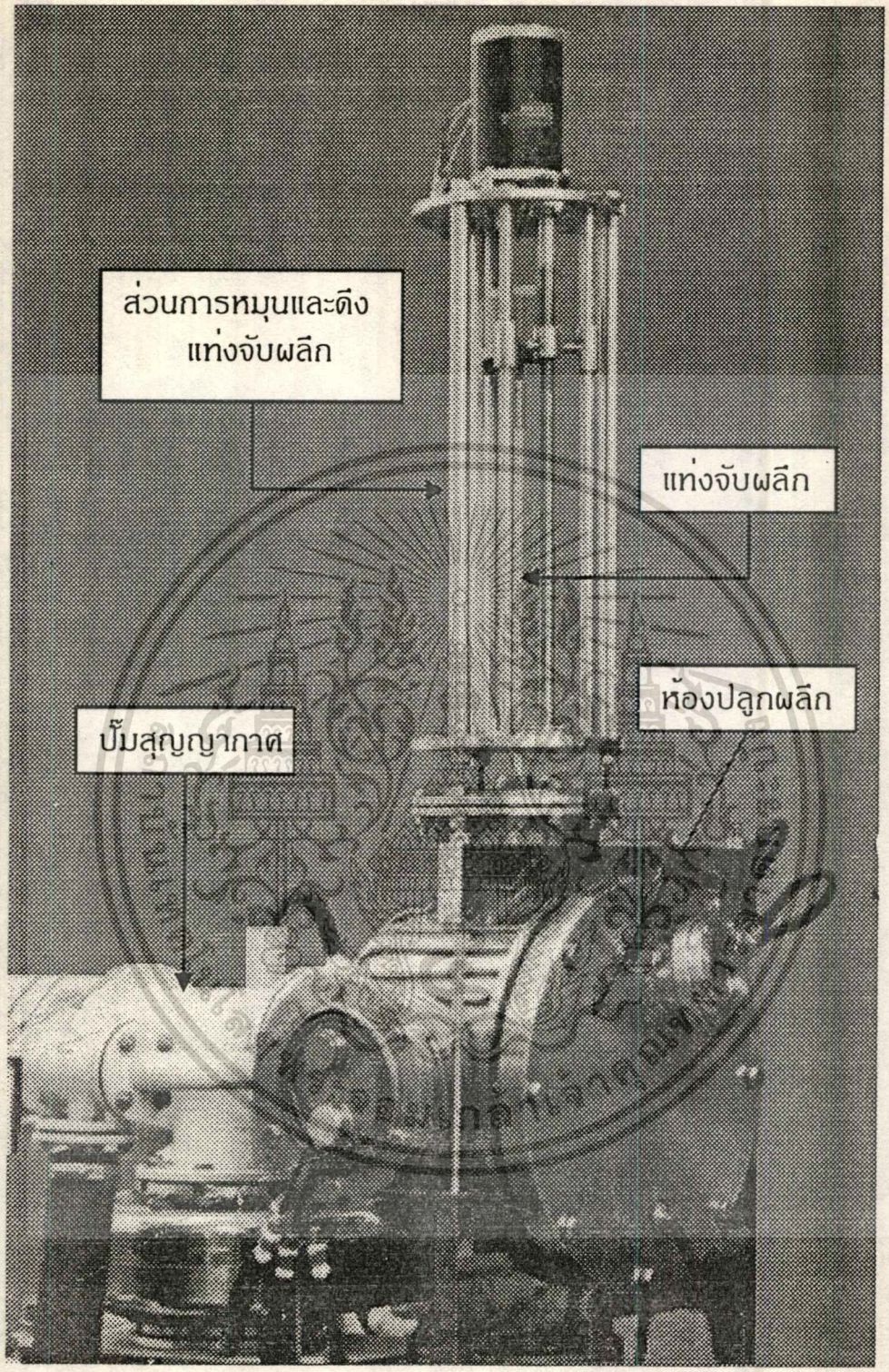
1. แบบวีอาร์มอเตอร์ (variable reluctance; VR)

2. แบบพีเอ็มมอเตอร์ (permanent Magnet; PM)

3. แบบไฮบริดจ์มอเตอร์ (hybrid)

แต่แบบที่นิยมใช้มากที่สุดคือแบบที่มีโรเตอร์เป็นแกนแม่เหล็ก (* รายละเอียดและการใช้งานของแต่ละชนิดดูในภาคผนวก ค.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



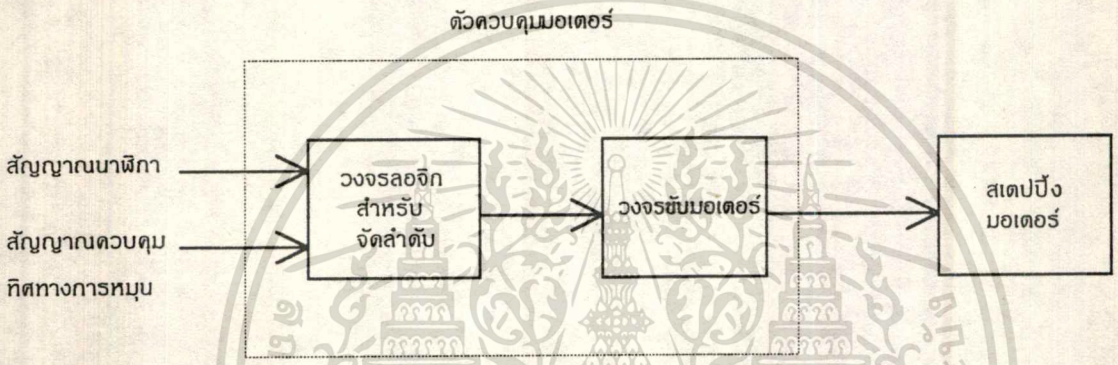
รูปที่ 4.1 แสดงส่วนการหมุนและดึงผลึกที่ประกอบอยู่บนห้องปลูกผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานของสเตปปิ้งมอเตอร์มีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของพัลส์ที่ป้อนเข้ามาและเงื่อนไขของภาระ (load) ภายใต้การใช้งาน จะมีเพลาหมุนเป็นสเตป (step) เมื่อ

- ป้อนอินพุทด้วยพัลส์ที่มีความถี่ค่าหนึ่ง
- จะสเตปไปหนึ่งสเตปในแต่ละพัลส์
- ขนาดของสเตปขึ้นอยู่กับการออกแบบสเตปมอเตอร์

การทำงานของสเตปปิ้งมอเตอร์ขึ้นอยู่กับพัลส์ที่ป้อนให้กับขดลวดเฟส (phase) ของมอเตอร์ในลำดับที่ถูกต้องโดยวงจรลอจิกสำหรับจัดลำดับ (sequencer logic) ด้วยกระแสที่พอเพียงโดยวงจรขับ (driver) พิจารณาตัวอย่างการควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์ในรูปที่ 4.2.



รูปที่ 4.2 แสดงการควบคุมการทำงานของสเตปปิ้งมอเตอร์

ในรูปที่ 4.2 สเตปปิ้งมอเตอร์จะทำงานเมื่อเราป้อน

- สัญญาณพัลส์นาฬิกา
- อินพุทสำหรับควบคุมทิศทางการหมุน

ตัวควบคุมของสเตปปิ้งมอเตอร์จะเชื่อมต่อ (interface) ได้โดยตรงกับไมโครโปรเซสเซอร์หรือไมโครคอมพิวเตอร์

สเตปปิ้งมอเตอร์สามารถกำหนดตำแหน่งของโหลดได้อย่างเที่ยงตรงมากเนื่องจากแต่ละอินพุทพัลส์จะทำให้สเตปมอเตอร์เคลื่อนที่ไปหนึ่งสเตปอย่างเที่ยงตรง การใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ในการควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์จะทำให้เราสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ประเภทนี้ได้โดยสะดวกคือ ไม่ต้องเปลี่ยนแปลงลักษณะของวงจรเลย สามารถที่จะควบคุมความเร็วและจำนวนสเตปได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งยังสามารถจะควบคุมจำนวนองศาต่อสเตปและทิศทางในการหมุนได้อีกด้วย จึงเหมาะสำหรับระบบควบคุมที่ต้องการความคล่องตัวและความยืดหยุ่นได้สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ตัวควบคุม

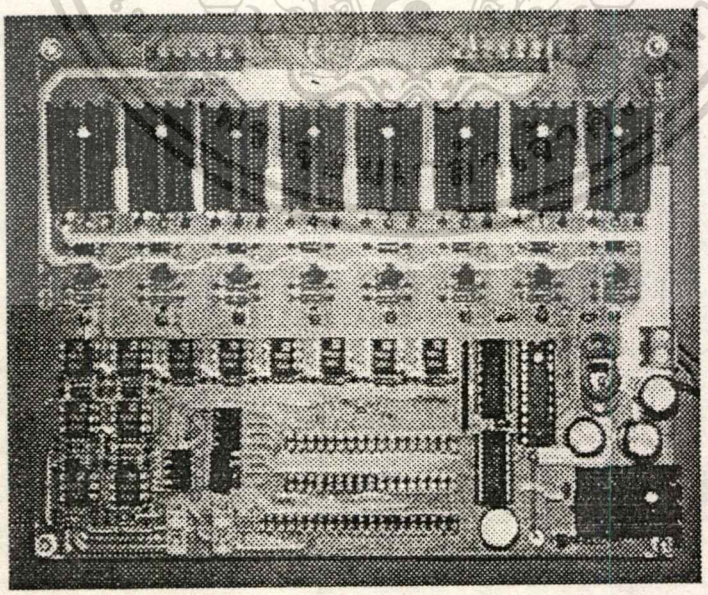
ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าได้ออกแบบการควบคุมการทำงานของสเตปปิ้งมอเตอร์ด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งสามารถควบคุมความเร็ว จำนวนสเตปได้อย่างเที่ยงตรง เลือกทิศทางการหมุนได้ และสามารถเปลี่ยนจำนวนองศาต่อสเตปได้ด้วย ส่วนควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ที่เป็นแบบซิงเกิลบอร์ด (single board) มี z8032 เป็นไมโครโปรเซสเซอร์

สเตปปิ้งมอเตอร์เปรียบเสมือนทรานสดิวเซอร์เครื่องกลไฟฟ้า (electromechanical transducer) ซึ่งเมื่ออินพุทเป็นกลุ่มของไบนารีโวลท์เตจ (binary voltage) และมีเอาท์พุทเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นสเตป รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงอุปกรณ์บนแผ่นวงจรควบคุมและแผ่นวงจรขับมอเตอร์

4.2.1 การสร้าง

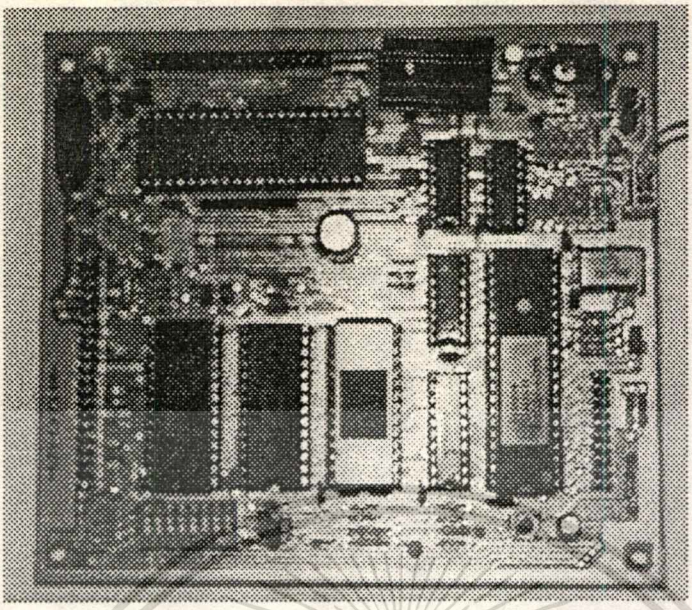
ส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรควบคุมการทำงานของสเตปปิ้งมอเตอร์คือ

1. วงจรซิงเกิลบอร์ดและแสดงผล (single board and display)
2. วงจรขับมอเตอร์ (motor driver)
3. สเตปปิ้งมอเตอร์ (stepping motor)
4. วงจรปรับแรงดัน (voltage regulator) 5 VDC 3 Amps



รูปที่ 4.3 แสดงแผ่นวงจรขับของสเตปปิ้งมอเตอร์

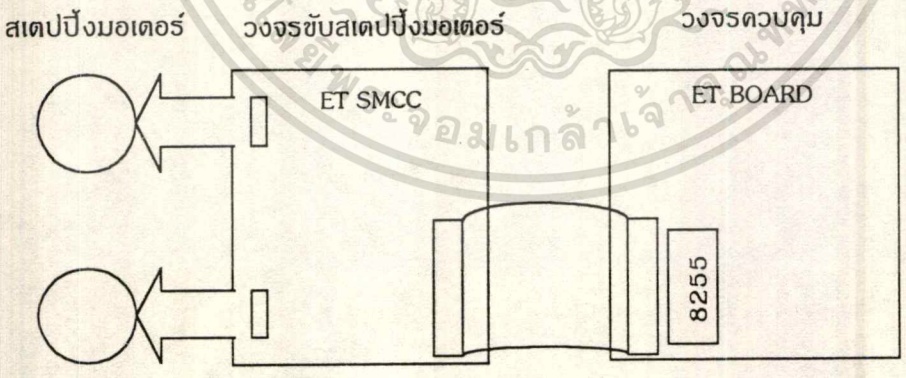
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงแผ่นวงจรไมโครโปรเซสเซอร์

4.4.2 การทำงานของวงจรควบคุม

ส่วนควบคุมที่ใช้จะเป็น ET board version 3.5 ที่มีการต่อพอร์ต 8255 เพื่อใช้ในการส่งข้อมูล โดยใช้พอร์ต A ส่งสัญญาณควบคุมขนาด 8 บิทสำหรับสเตปปิ้งมอเตอร์จำนวน 2 ตัว ซึ่งแบ่งกันใช้ตัวละ 4 บิท เมื่อทำการต่อส่วนควบคุม ภาคขับ และสเตปปิ้งมอเตอร์ จึงสามารถแสดงได้ดังรูป

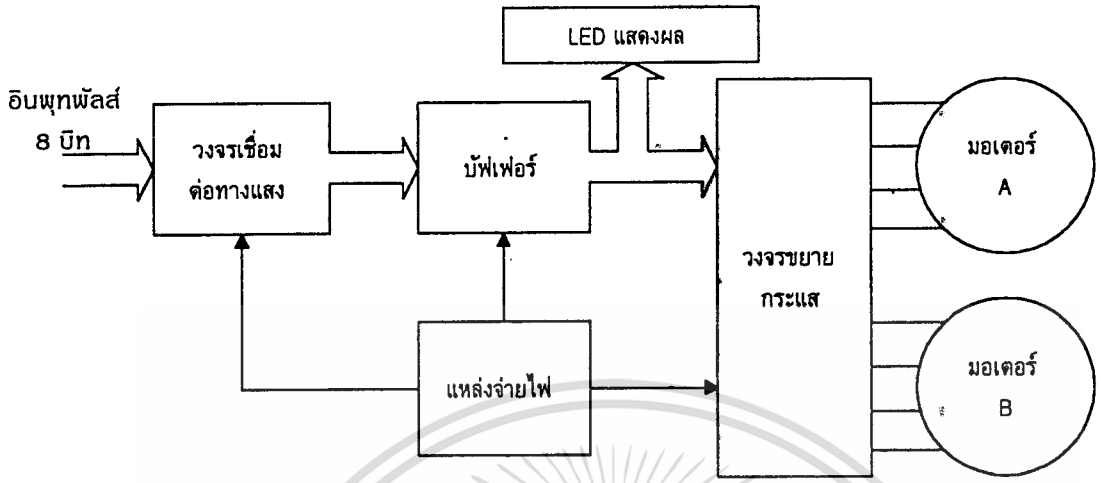


รูปที่ 4.5 แสดงการต่อส่วนควบคุม ภาคขับ และสเตปปิ้งมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 การทำงานของวงจรขับสเตปปิ้งมอเตอร์

ในการควบคุมการหมุนของสเตปปิ้งมอเตอร์ใช้วงจรการควบคุมแบบเปิดดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 4.6 บล็อคไดอะแกรมของวงจรขับสเตปปิ้งมอเตอร์

โดยเมื่อรับสัญญาณพัลส์ของข้อมูลขนาด 8 บิทที่เป็นรหัสควบคุมการหมุนเข้ามา จะนำมาผ่านวงจรเชื่อมต่อทางแสง (opto coupped device) เพื่อให้ตัดความสัมพันธ์ระหว่างวงจรขับจากวงจรควบคุมอย่างเด็ดขาด สัญญาณ 8 บิทที่ได้จะนำมาเข้าบัฟเฟอร์เพื่อทำการปรับปรุงสัญญาณอีกครั้ง และนำไปแสดงผลด้วย LED บิทละ 1 ตัวเพื่อกระพริบแสดงการเลื่อนตัวของสัญญาณควบคุม สัญญาณเดียวกันนี้ก็จะนำเข้าวงจรขับกำลังที่ใช้ทรานซิสเตอร์กำลังต่อกันเป็นคู่ในลักษณะ darlington เพื่อขยายกระแสให้สเตปปิ้งมอเตอร์ โดยสเตปปิ้งมอเตอร์ 1 ตัวจะใช้สัญญาณขนาด 4 บิท สำหรับไฟเลี้ยงของแผ่นวงจรขับนี้จะแยกต่างหากเพื่อให้ได้กระแสสูงตามที่สเตปปิ้งมอเตอร์ต้องการ โดยจะแบ่งบางส่วนมาจ่ายให้อุปกรณ์ทั้งหมดบนแผ่นวงจรขับนี้ด้วย จึงไม่มีปัญหาในการโหลดกระแสจากวงจรควบคุม

4.3 โปรแกรมควบคุมการทำงานของสเตปปิ้งมอเตอร์

โปรแกรมควบคุมการทำงานของสเตปปิ้งมอเตอร์ ดังที่กล่าวมาแล้วแต่ต้นว่าการควบคุมการทำงานของสเตปปิ้งมอเตอร์สามารถใช้วงจรไดรเวอร์ที่มีอยู่ร่วมกับ ET BOARD Z 80 ได้ ดังนั้นโปรแกรมควบคุมจึงได้แบ่งออกเป็นสองโปรแกรมดังนี้คือ

1. โปรแกรมเมื่อใช้ควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์ด้วย ET BOARD Z 80 เวอร์ชัน 3 ขึ้นไป
2. โปรแกรมเมื่อใช้ควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์ด้วย Z 8032 microprocessor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 โปรแกรมที่ 1

ใช้ควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์ด้วย ET BOARD Z 80 เวอร์ชัน 3 ขึ้นไป มีลำดับการทำงานดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.7 โดยเริ่มต้นจากการกำหนดจำนวนครั้งการวนรอบในการหน่วงของมอเตอร์ทั้งสอง จากนั้นจะทำการตรวจสอบว่าเวลาในการหน่วงของมอเตอร์ตัวใดหมดไปหรือยัง ถ้าตัวใดหมดจะให้การเอาท์พุทที่พอร์ตของสเตปปิ้งมอเตอร์ตัวนั้น 1 ครั้ง โดยข้อมูลที่นำไปเอาท์พุทพอร์ตให้นั้นเป็นการเลื่อนข้อมูลไป 1 บิทต่อครั้ง การเลื่อนข้อมูลทางซ้ายคือให้มอเตอร์หมุนไปทางหนึ่ง เลื่อนทางขวาคือให้มอเตอร์หมุนกลับไปอีกทางหนึ่ง ซึ่งข้อมูลเริ่มต้นสำหรับการขับแบบ half drive คือ 0001 สำหรับการขับแบบ full drive คือ 0011 ในที่นี้เลือกที่จะใช้การขับแบบ full drive เพื่อที่จะให้แรงบิดได้สูงกว่า ข้อมูลในการควบคุมขนาด 8 บิทนี้จะส่งต่อไปให้กับวงจรขับเพื่อทำหน้าที่ในการขับต่อไป สำหรับการกำหนดค่าเริ่มต้นต่าง ๆ ในโปรแกรมสามารถกำหนดได้ดังนี้

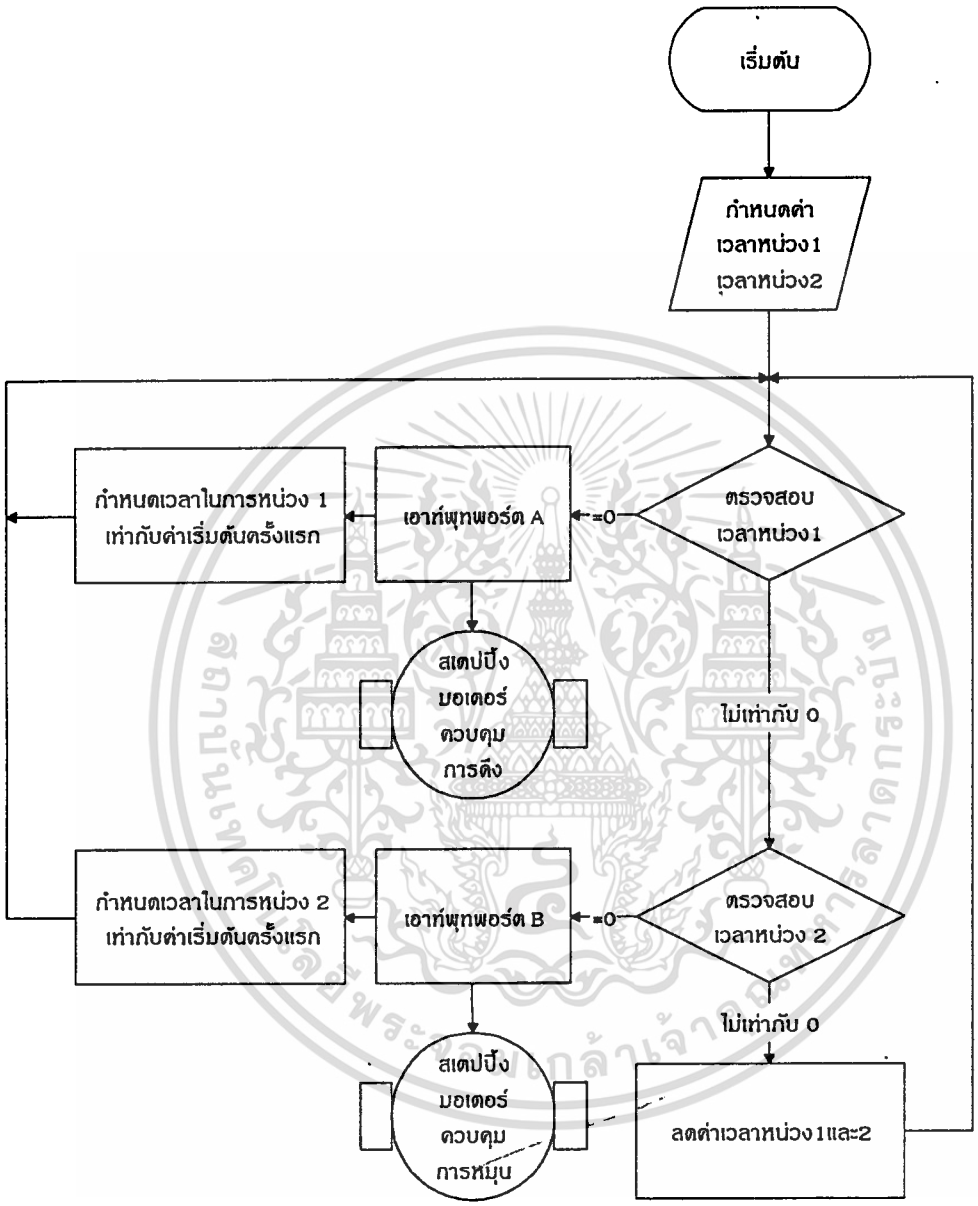
- ในการให้มอเตอร์หมุนทางซ้ายคือการใช้คำสั่ง RLC (rotate left circle) หมุนทางขวาคือ RRC (rotate right circle) โดยเปลี่ยนแปลงได้ที่บรรทัด 2027H และ 2033H ของโปรแกรม
- ในการตั้งค่าเวลาในการหน่วงของมอเตอร์ทั้งสอง สามารถตั้งได้ที่บรรทัด 2038H และ 2040H
- ในการตั้งค่ารูปแบบในการขับสามารถตั้งได้ที่บรรทัด 200CH

โดยเป็น 0001 0001 0001 0001 สำหรับการขับแบบ half drive

และเป็น 0011 0011 0011 0011 สำหรับการขับแบบ full drive

สำหรับโปรแกรมที่ 1 นี้เป็นโปรแกรมอย่างง่ายเพื่อใช้ทดสอบเท่านั้นในการใช้งานจริงใช้โปรแกรมสำเร็จที่มีการรับคีย์บอร์ดใช้ควบคุมทิศทางดังแสดงในภาคผนวก ค. หน้า ค-27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7. แสดงโฟล์วชาร์ตลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์ในการควบคุมการหมุนและการดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ 1 แอสเซมบลี้ (assembly) ควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์

แอสเดรส	รหัส	ลูป	คำสั่ง
2000	ED 4B 38 20		LD BC, (nn)
2004	ED 5B 40 20		LD DE, (nn)
2008	3E 80		LD A, 80
200A	D3 23		OUT (23), A
200C	21 33 33		LD HL, 3333H
200F	79	LOOP	LD A, C
2010	B0		OR A ,B
2011	FE 00		CP A, 0
2013	28 0B		JR Z, OUTPORT A
2015	7A		LD A, D
2016	B3		OR A, E
2017	FE 00		CP A, 0
2019	28 11		JR Z, OUTPORT B
201B	0B		DEC BC
201C	1B		DEC DE
201D	C3 OF 20		JP LOOP
2020	7C	OUTPORT A	LD A, H
2021	D3 20		OUT (20), A
2023	ED 4B 3820		LD BC, (2038H)
2027	CB 04 →CB 0C		RLC H→RRC H
2029	C3 0F 20		JP LOOP
202C	7D	OUTPORT B	LD A, L
202D	D3 21		OUT (21), A
202F	ED 5B 4020		LD DE, (2040H)
2033	CB 05 →CB 0D		RLC L→RRC L
2035	C3 0F 20		JP LOOP
2038	00 10		dellay time for motor A
2040	00 40		dellay time for motor B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 โปรแกรมที่ 2

ใช้ควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์ด้วย CPU เบอร์ 8032 AH BASIC

```
10 REM        *stepping motor*
20 REM        *CP-32 & ET-BASIC 32*
30 PA=0E0E0H : PB=0E0E1H : PC=0E0E3H
40 XBY(PC)=80H
50 FOR I = 1 TO 4
60 READ A
70 XBY(PA) = A
80 GOSUB 200
90 NEXT I
100 DATA 11H, 22H, 44H, 88H
110 FOR I = 1 TO 100 : NEXT I
120 FOR I = 1 TO 4
130 READ A
140 XBY(PB) = A
150 GOSUB 250
160 NEXT I
170 DATA 11H, 22H, 44H, 88H
180 FOR I = 1 TO 100 : NEXT I
190 GOTO 50
200 FOR D1 = 1 TO 100 : NEXT D1 : RETURN  ←  หน่วงเวลามอเตอร์ 1
250 FOR D2 = 1 TO 100 : NEXT D2 : RETURN  ←  หน่วงเวลามอเตอร์ 2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ข้อมูลจำเพาะของระบบหมุนและดึงผลึก

จากที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดในบทนี้ พอที่จะบ่งบอกความสามารถของส่วนหมุนและดึงผลึกสำหรับระบบปลูกผลึกซิลิกอนแบบโชคราลสกีดังนี้คือ

specifications

Pulling Head

Hight		570	mm
Diameter of base flange		196	mm
Translation speed range		0 to 240	cm/hr
Maximum traverse		300	mm
Rotation speed range		0.25 to 188	rpm reversible

Control Unit

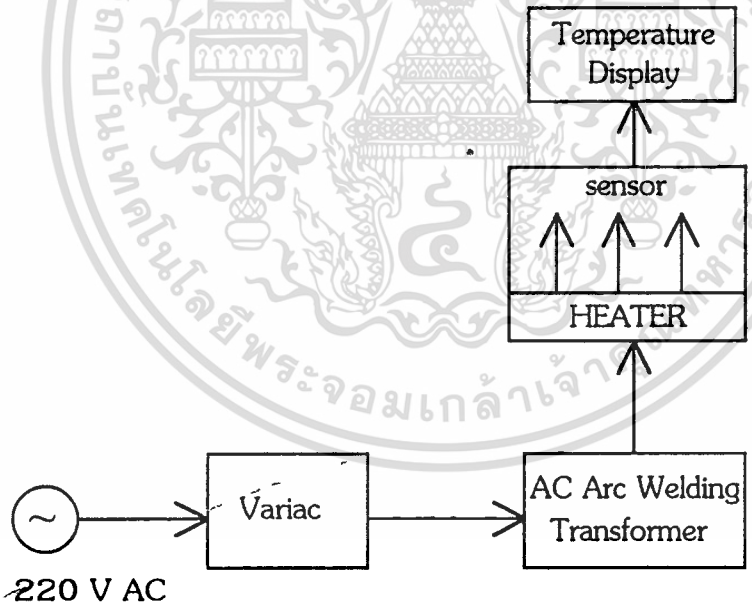
Dimensions	width	215	mm
	hight	85	mm
	depth	185	mm
Power supply		**220 V AC, 50 Hz, 4 Amps**	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ระบบจ่ายกำลังและควบคุมอุณหภูมิ

5.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (power supply)

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีส่วนสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ต้องการนั่นก็หมายความว่าจะต้องจ่ายกำลังเท่าใดจึงจะได้อุณหภูมิถึงจุดที่ต้องการ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการระบายความร้อนภายในระบบว่าเป็นอย่างไร ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ตัวทำความร้อนแล้วทำการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในห้องปลูกผลึก โดยทดลองใช้หม้อแปลงไฟฟ้า (arc welding transformer) ที่มีอยู่เดิมซึ่งเป็นหม้อแปลงที่ใช้ในงานเชื่อมโลหะทำการจ่ายกำลังให้กับตัวทำความร้อนภายในห้องปลูกผลึกทางขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นแท่งทองแดงที่มีการหล่อเย็นดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.2 รูปที่ 5.1 จะแสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของการทดลองใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอยู่เดิม



รูปที่ 5.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมในการทดลองใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอยู่เดิม

ในการทดลองใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอยู่เดิมทำการจ่ายกำลังไฟฟ้า เริ่มต้นจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เข้าที่วาริแอค (variac) เพื่อทำการลดค่าแรงดันไฟฟ้าลงก่อนจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า ปรากฏว่าที่เอาท์พุทของวาริแอคเป็น 50 โวลต์ (volt) 12.5 แอมป์ (amp) และเอาท์พุทของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็น 5.13 โวลต์ 45 แอมป์ อุณหภูมิที่

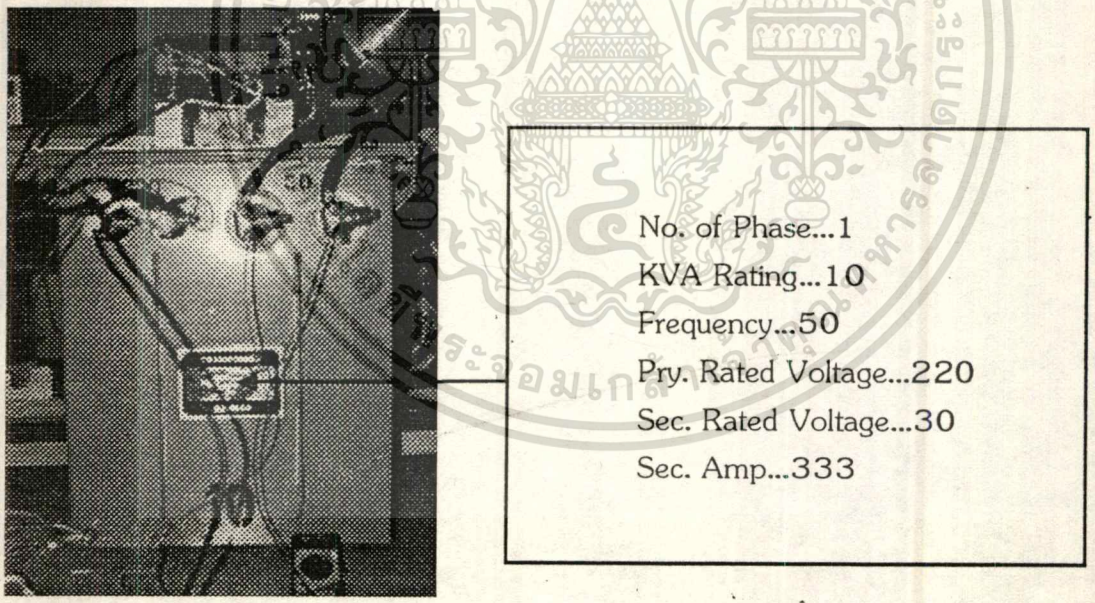
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมคับเปิลอ่านค่าได้ประมาณ 400 องศาเซลเซียส (วัดที่ประมาณกึ่งกลางของตัวทำความร้อน) หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอยู่เดิมก็เริ่มมีปัญหาเนื่องจากความไม่เหมาะสมในการทำงานเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง จึงได้ค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในห้องปลูกผลึกดังแสดงในบทที่ 6 ผลการทดลอง

อย่างไรก็ตามการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบว่าระบบภายในห้องปลูกผลึกมีการระบายความร้อนได้ดีเพียงไร และควรจะใช้กำลังของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยประมาณเท่าไรในการทำให้อุณหภูมิของจุดที่ต้องการวัดถึงค่าที่ต้องการ (ประมาณ 1,412 องศาเซลเซียส) จากการทดลองจึงประมาณเอาว่ากำลังของหม้อแปลงไฟฟ้าจะไม่เกิน 6 กิโลวัตต์ และต้องเหมาะสมในการใช้งานจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง และต้องมีการระบายความร้อนของตัวหม้อแปลงไฟฟ้าที่ดี

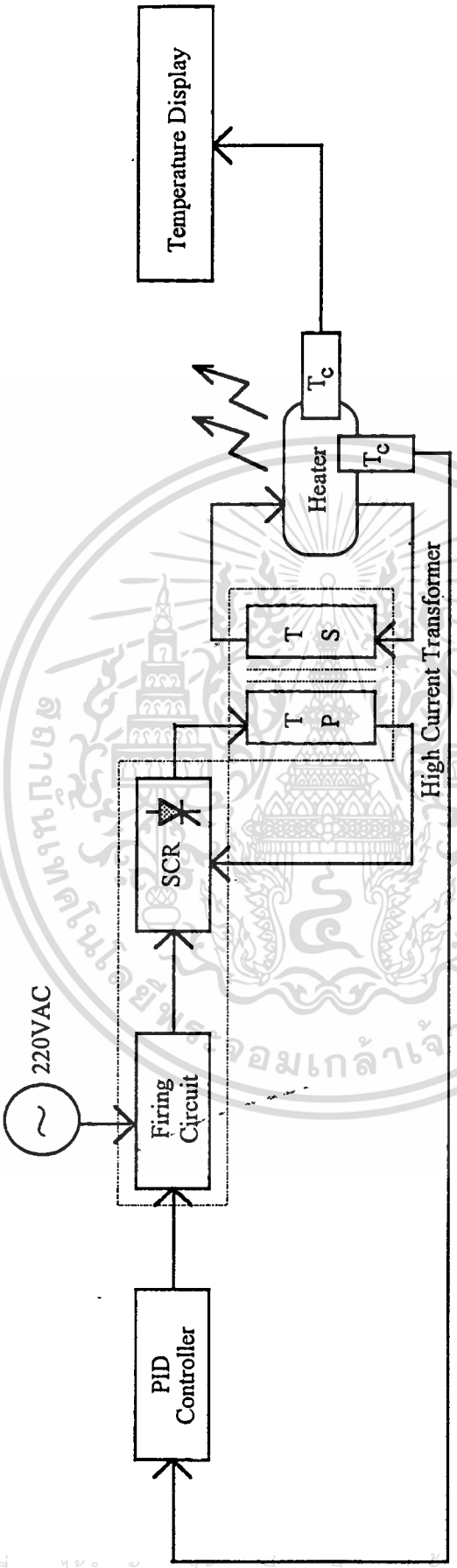
ดังนั้นจึงได้สั่งทำหม้อแปลงไฟฟ้าตัวใหม่ขึ้น จ่ายกระแสสูงสุดได้ 330 แอมป์แปร์ เป็นชนิดแปลงแรงดันลง (stepdown transformer) อินพุท 220 V AC เอาท์พุท 30 V AC แบบระบายความร้อนด้วยน้ำมัน มีกำลัง 10 กิโลวัตต์ (เนื่องจากราคาสั่งทำใกล้เคียงกัน) รูปที่ 5.2 แสดงหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำขึ้นใหม่

บล็อกไดอะแกรมในการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูงที่จัดทำขึ้นใหม่ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะหม้อแปลงไฟฟ้าที่จัดทำขึ้นใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่จัดทำขึ้นใหม่
สำหรับระบบปลูกผลึกแบบโซคราลสกี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากบล็อกไดอะแกรม เริ่มจากการจ่ายกระแสสลับ 220 V เข้าสู่วาริแอคซึ่งต่อเข้าสู่ด้านอินพุทของวงจรไฟริ่งหรือวงจรควบคุมเฟสทางไฟฟ้า ในการทดลองของระบบปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้นมานี้ได้ใช้โมดูลควบคุมกำลังของบริษัท SEMIKRON รุ่น SKPC 200-240 Phase angle trigger module 658-148* (*ดูรายละเอียดของบล็อกไดอะแกรมในภาคผนวก ง.) สำหรับค่าอินพุทของโมดูลควบคุมกำลังมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 5 โวลต์ รอรับการควบคุมมาจากตัวควบคุมพีไอดี (PID controller)

ค่าเอาท์พุทที่ออกมาจากโมดูลควบคุมกำลังจะถูกส่งไปควบคุมเอสซีอาร์ 2 ตัวที่ต่อขนานกลับขั้วกันอยู่เพื่อขับโหลดตัวละครึ่งช่วงคลื่นเพื่อทำให้เป็นการขับโหลดแบบเต็มช่วงคลื่น (full wave) โดยได้ใช้เอสซีอาร์เบอร์ SC70c-80 SYNRAX** ทั้ง 2 ตัวซึ่งต่ออนุกรมกับขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูง เอสซีอาร์ทั้งคู่มีอัตราทนแรงดันย้อนกลับต่อเนื่อง (repetitive peak reverse voltage) ได้สูงสุด 800 โวลต์ (**ดูการต่อเอสซีอาร์เข้ากับโมดูลและโหลดในภาคผนวก ง.)

โหลดของเอสซีอาร์คือหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูงที่พยายามรักษาอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าอินพุทกับเอาท์พุทให้เท่ากับหนึ่ง ทางด้านปฐมภูมิเอาท์พุทที่ออกมาจากเอสซีอาร์สูงสุด 220 โวลต์ประมาณ 27 แอมป์ โดยให้เอาท์พุททางด้านทุติยภูมิสูงสุดเป็น 30 โวลต์ 200 แอมป์ ที่โหลด 0.16 โอห์มของกราไฟต์ ทำให้มีกำลังสูงสุดประมาณ 6 กิโลวัตต์เพื่อใช้ในการทำความร้อนของกราไฟต์

5.1.1 การดำเนินการ

เริ่มจากการทดลองใช้หม้อแปลงที่มีอยู่เดิมจ่ายกระแสให้ตัวทำความร้อนที่อยู่ภายในห้องปลูกผลึก วัดกระแส แรงดันที่ใช้ และอ่านค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตามจุด ต่าง ๆ ที่ทำการวัด (ดูในบทที่ 5 ผลการทดลอง) จากนั้นออกแบบและจัดทำหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้นใหม่เพื่อความเหมาะสมในการทำงาน

5.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ (temperature control system)

ส่วนของการวัดและการควบคุมอุณหภูมิเป็นส่วนที่สำคัญมากที่สุดสำหรับการปลูกผลึกแบบโชคราล์สกี เพราะอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดในการเกิดผลึก จึงต้องระมัดระวังและควบคุมเป็นพิเศษในเรื่องความถูกต้องแม่นยำและให้คงที่ที่สุด โดยเฉพาะตรงจุดปลูกผลึกได้พยายามออกแบบและทำการควบคุมอุณหภูมิให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ไม่เช่นนั้นแล้วการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ไม่ได้ผลึกตามที่ต้องการหรืออาจไม่สามารถปลูกผลึกขึ้นมาได้ ทั้งนี้ก่อนการปลูกผลึกจริงจึงต้องมีการทดลองวัดและเก็บข้อมูลของอุณหภูมิภายในห้องปลูกผลึกหลาย ๆ ครั้งจนกว่าจะเห็นว่าเหมาะสมสำหรับการปลูกผลึกซิลิกอนได้จึงทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองใส่สารกึ่งตัวนำซิลิกอนลงในเบ้าหลอมเพื่อทำการหลอมเหลวสำหรับการปลูกผลึกรูปเดี่ยวต่อไป

เนื่องจากระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกีที่พัฒนาขึ้นมุ่งหวังให้เหมาะสมสำหรับการปลูกผลึกซิลิกอน ดังนั้นในการเลือกใช้หัววัดอุณหภูมิจึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับช่วงของอุณหภูมิที่จะวัด ในที่นี้ได้ใช้เทอร์โมคับเปิล (thermocouple) ชนิด R, Pt 13% Rh เป็นหัววัด การเลือกชนิดของเทอร์โมคับเปิลกับช่วงอุณหภูมิที่จะวัดดูได้ดังตารางที่ 3.1 ในระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกีที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ใช้เทอร์โมคับเปิลสองอันในการวัดอุณหภูมิ โดยมีการติดตั้งดังนี้

อันที่หนึ่งติดตั้งไว้ที่ข้อต่อซึ่งอยู่ที่ฝาด้านข้างซ้ายของห้องปลูกผลึก ไว้สำหรับทำการตรวจวัดอุณหภูมิในแนวด้านข้างของห้องปลูกผลึกจากบริเวณผิวของตัวทำความร้อนมายังบริเวณฝาด้านข้างซ้าย โดยผ่านทางรูผนังของฉนวนกั้นความร้อนทั้งที่เป็นกราไฟต์และแผ่นโมลิบดินัมที่ได้รับการเจาะเตรียมเอาไว้

อันที่สองติดตั้งไว้ที่ข้อต่อซึ่งอยู่ตรงกลางของฝาด้านล่างของห้องปลูกผลึก ไว้สำหรับทำการตรวจวัดอุณหภูมิในแนวตั้งของห้องปลูกผลึกซึ่งผลึกจะถูกดึงขึ้นมาในแนวนี้ เทอร์โมคับเปิลอันนี้จะทำการวัดอุณหภูมิจากบริเวณเหนือส่วนบนของฉนวนกั้นความร้อนทั้งสองผ่านกึ่งกลางของตัวทำความร้อน บริเวณที่ตั้งของเบ้าหลอม ตลอดมาจนถึงบริเวณฝาด้านล่าง อุณหภูมิทั้งหมดในส่วนนี้เป็นตัวแปรที่สำคัญยิ่งสำหรับการปลูกผลึกดังกล่าว สัญญาณเอาท์พุท (output) จากเทอร์โมคับเปิลจะเข้ามายังเครื่องอ่านค่าเป็นอุณหภูมิทำให้ทราบค่าของอุณหภูมิของจุดที่ทำการวัดได้ทันที

5.2.1 การควบคุมอุณหภูมิสำหรับระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกี

ระบบควบคุมอุณหภูมิที่ใช้สำหรับระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกีที่ได้พัฒนาขึ้นมานี้ใช้กระบวนการควบคุม* แบบมีการป้อนกลับ (feedback control) เป็นการควบคุมแบบปิด (closed loop control) หรือแบบอัตโนมัติ (automatic control) โดยใช้เครื่องควบคุมแบบพีไอดี (proportional integral derivatie; PID controller) (* รายละเอียดของกระบวนการควบคุมจะกล่าวไว้ในภาคผนวก จ.) โดยมีกระบวนการวัดและควบคุมอุณหภูมิสัมพันธ์กับการจ่ายกำลังไฟฟ้าดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5.3

ในการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องปลูกผลึก ได้แบ่งการทำงานของกระบวนการควบคุมเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ

- ◆. การทำงานของส่วนอินพุท (input temperature)
- ◆. การทำงานของส่วนเอาท์พุท (output temperature)
- ◆. การแสดงผลของอุณหภูมิ (temperature display)

จากบล็อกไดอะแกรมรูป 5.3 อินพุทของตัวทำความร้อนจะรับมาจากด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า (secondary transformer) ส่วนทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า (primary transformer) จะถูกควบคุมแรงดันอินพุทโดยวงจรควบคุมเอาท์พุทของตัวทำความร้อนจะถูกส่งออกมาโดยหัววัดเทอร์โมคับเปิล เทอร์โมคับเปิลอันหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตัวทำความร้อนจะถูกส่งออกมาโดยหัววัดเทอร์โมคับเปิล เทอร์โมคับเปิลอันหนึ่งทำการตรวจวัดอุณหภูมิ แล้วมาแสดงผลค่าอุณหภูมิที่ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ (digital thermometer) โดยไม่ผ่านการควบคุมอุณหภูมิ เทอร์โมคับเปิลอีกอันหนึ่งที่ทำการตรวจวัดอุณหภูมิจากตัวทำความร้อนจะส่งค่าเอาท์พุทออกไปยังตัวพีไอดีหรือเครื่องควบคุมอัตโนมัติ จากนั้นพีไอดีจะทำการเปรียบเทียบค่ากับอุณหภูมิที่ได้รับการตั้ง (set) ไว้ จากนั้นจะแปลงเป็นสัญญาณเอาท์พุทออกไปยังส่วนวงจรไฟริง ในส่วนของวงจรไฟริงจะมีการขยายสัญญาณอินพุทที่เข้ามาด้วยแล้วส่งเอาท์พุทไปทริก (trig) ขาเกท (gate) ของเอสซีอาร์ (SCR) ทั้งสองตัว ซึ่งเอสซีอาร์ทั้งสองตัวนี้ก็จะส่งเอาท์พุทไปยังขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อไป

จะเห็นได้ว่าเป็นกระบวนการควบคุมแบบที่มีการป้อนกลับได้ โดยตัวควบคุมพีไอดีจะเป็นตัวกำหนดว่าควรจะส่งเอาท์พุทออกไปควบคุมเท่าไรถึงจะให้จ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการและควบคุมให้คงที่

5.2.2 ส่วนประกอบสำคัญในการควบคุมอุณหภูมิ

1. ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (temperature sensors)
2. ตัวทำความร้อน (heater element)
3. ตัวควบคุมพีไอดี (PID controller)
4. วงจรไฟริง (firing circuit)
5. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (power supply)

5.2.2.1 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

ตัวตรวจวัดอุณหภูมิของระบบปลูกผลึกนี้ใช้เทอร์โมคับเปิลชนิด R; Pt 13% Rh เพราะว่าอุณหภูมิที่ต้องการใช้วัดจะอยู่ในย่านสูงประมาณ 1,412 องศาเซลเซียส ซึ่งเทอร์โมคับเปิล*ชนิดนี้เป็นชนิดที่เหมาะสมสำหรับอุณหภูมิย่านนี้ (* พิจารณาจากตารางที่ 3.1) และโดยที่กล่าวมาแล้วว่าเทอร์โมคับเปิลอันหนึ่งทำการตรวจวัดอุณหภูมิแล้วมาแสดงผลค่าอุณหภูมิที่ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ เทอร์โมคับเปิลอีกอันหนึ่งที่ทำการตรวจวัดอุณหภูมิจากตัวทำความร้อนจะส่งค่าเอาท์พุทออกไปยังตัวพีไอดีหรือเครื่องควบคุมอัตโนมัติ

5.2.2.2 ตัวทำความร้อน

ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อก่อนว่าได้ใช้ตัวทำความร้อนที่เป็นกราไฟต์ซึ่งมีความต้านทานขณะที่ยังไม่ได้ทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 160 มิลลิโอห์ม ตัวทำความร้อนกราไฟต์ดังกล่าวนี้ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5.3 จะเห็นว่าต่ออยู่ทางด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูงซึ่งได้รับการควบคุมมาจากทางด้านขดลวดปฐมภูมิ และสังเกตได้ว่าเป็นการควบคุมแบบมีการป้อนกลับได้โดยเทอร์โมคับเปิลที่เป็นตัวตรวจวัดและควบคุมจะรับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของตัวทำความร้อนเข้ามาที่ตัวควบคุมพีไอดี ตัวควบคุมพีไอดีก็จะส่งเอาท์พุทออกไปผ่านวงจรควบคุมเกทของเอสซีอาร์เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูงดังกล่าวนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2.3 ตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดี* ที่ใช้ในระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกี (* ดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก จ.) เป็นตัวควบคุมรุ่นที่ใช้สำหรับการควบคุมอุณหภูมิโดยตัวควบคุมนี้จะรับค่าอินพุทจากเทอร์โมคับเปิลที่ต่อถึงกันอยู่แล้วส่งเอาท์พุทเป็นแรงดันไฟฟ้าออกมาเพื่อเข้าไปควบคุมกระบวนการจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อไป

5.2.2.4 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ในกระบวนการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่ตัวทำความร้อน เริ่มต้นจากการใช้กระแสไฟฟ้าสลับ 220 โวลต์เข้ามาเสตปดาวน์ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูงก่อนจ่ายกำลังให้กับตัวทำความร้อน ดังนั้นการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดเป็นการควบคุมทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูง ซึ่งได้กล่าวในหัวข้อ 5.1 นั่นเอง

5.2.3 ผลการควบคุมอุณหภูมิ

ผลการทดลองเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบปลูกผลึกและมีการควบคุมอุณหภูมิแล้วนั้น ดูได้จากผลการทดลองในบทที่ 6. ซึ่งจะแบ่งออกเป็นสองผลการทดลองใหญ่ ๆ คือ ผลการทดลองแรกทำการตรวจวัด (profile) อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในห้องปลูกผลึกโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติที่มีการป้อนกลับได้ ส่วนผลการทดลองหลังตรวจวัดอุณหภูมิในห้องปลูกผลึกเมื่อมีการควบคุมแบบอัตโนมัติแบบมีการป้อนกลับแล้ว

5.2.4 การดำเนินการ

ออกแบบและสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิและจัดหาตัวควบคุมอัตโนมัติ โดยใช้เทอร์โมคับเปิลที่เหมาะสมและประกอบเข้ากับเครื่องอ่านค่าเอาท์พุท (ดิจิตอลทอร์โมมิเตอร์) ประกอบชุดวัด-ควบคุมอุณหภูมิ เข้ากับห้องปลูกผลึก ทดลองวัดอุณหภูมิและเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการทดลอง

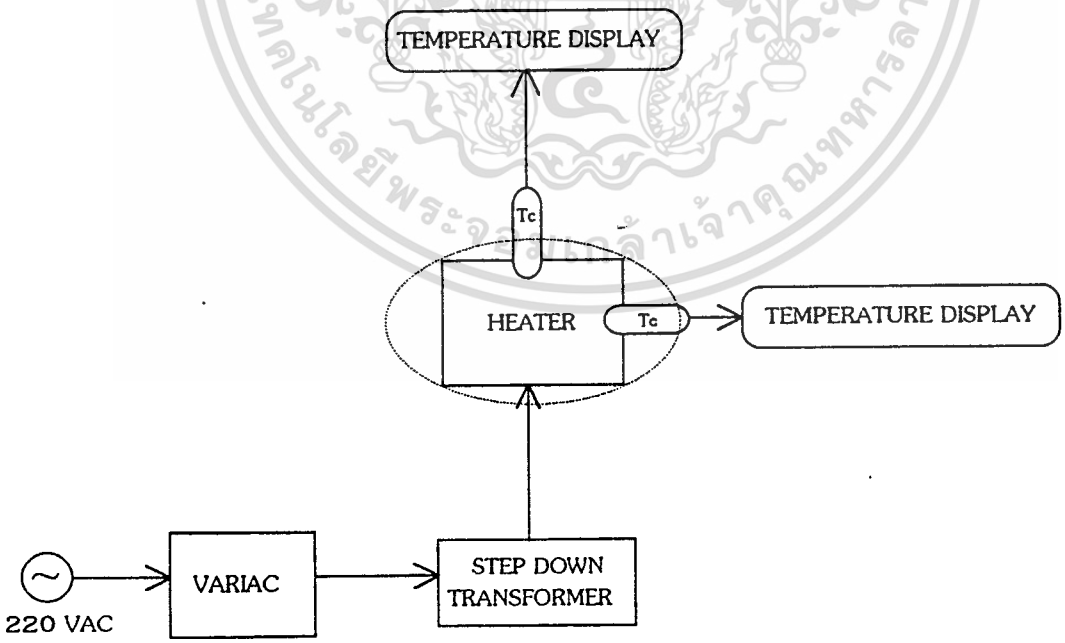
ในบทผลการทดลองเป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดอุณหภูมิ (temperature profile) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในห้องปลูกผลึกในแนวที่จะทำการดึงผลึก ซึ่งในการทดลองได้ทำเป็นสองลักษณะนั่นคือ

1. ค่าของอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดอุณหภูมิโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ (PID)

2. ค่าของอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดอุณหภูมิโดยมีการควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ (PID)

6.1 การตรวจวัดอุณหภูมิโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ

การดำเนินการทดลองจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับตัวทำความร้อนภายในห้องปลูกผลึกเพื่อทำการตรวจวัดอุณหภูมิแสดงดังบล็อกไดอะแกรมข้างล่างนี้



รูปที่ 6.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมในการทดลองโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อประกอบทุกชิ้นส่วนของระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกีเข้ากันและต่อกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นที่เรียบร้อยดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 6.1 พร้อมทั้งเปิดระบบหล่อเย็นทั้งหมด จากนั้นทำการปั๊มอากาศออกเพื่อทำให้ภายในห้องปลูกผลึกเป็นสุญญากาศด้วยระบบปั๊มสุญญากาศ ซึ่งในการทดลองสามารถปั๊มลงถึง 10^{-4} ทอร์ เริ่มจ่ายกระแสสลับ 220 โวลท์ให้กับวาริแอค (autotransformer) โดยสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าตามต้องการให้เป็นอินพุทของหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิ หม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าวเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดสเตปดาวน์ (แปลงแรงดันไฟฟ้าลง) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงลดลงแล้วจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับตัวทำความร้อนภายในห้องปลูกผลึก ได้ผลการทดลองในระดับหนึ่งดังข้อมูล ต่อไปนี้

ข้อมูลเบื้องต้นก่อนทำการทดลองจ่ายกำลังไฟฟ้า

- วาริแอค 220 V AC - 0 V AC, 50 Amps.
- หม้อแปลงไฟฟ้า 220 V AC - 80 V AC, 300 Amps.
- ความดันสุญญากาศ 1.2×10^{-4} Torr.
- เทอร์โมคัปเปิลอันที่หนึ่ง (T_c1) สำหรับใช้วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในห้องปลูกผลึกในแนวที่จะทำการการดึงผลึก
- เทอร์โมคัปเปิลอันที่สอง (T_c2) สำหรับใช้วัดอุณหภูมิด้านข้างที่ตำแหน่งผิวด้านนอกของแผ่นโมลิบดินัม
- เทอร์โมคัปเปิลอันที่สาม (T_c3) ตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำขาออกของระบบหล่อเย็น

ข้อมูลเมื่อทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับตัวทำความร้อนแล้ว

- วาริแอค อินพุท 220 VAC, เอาท์พุท 50 VAC, 12.5 Amps.
- หม้อแปลงไฟฟ้า อินพุท 50 VAC, เอาท์พุท 5.13 VAC, 45 Amps.
- T_c1 จะแสดงในรูปของ T/T_{max} ดังรูปกราฟที่ 6.2
- T_c2 อ่านค่าของอุณหภูมิสูงสุดได้ 128.7 องศาเซลเซียส
- T_c3 อ่านค่าของอุณหภูมิสูงสุดได้ 29 องศาเซลเซียส

จากการวัดแสดงว่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในหม้อแปลงไฟฟ้าเท่ากับ

$P_1 - P_2$ = 625-230.85 วัตต์

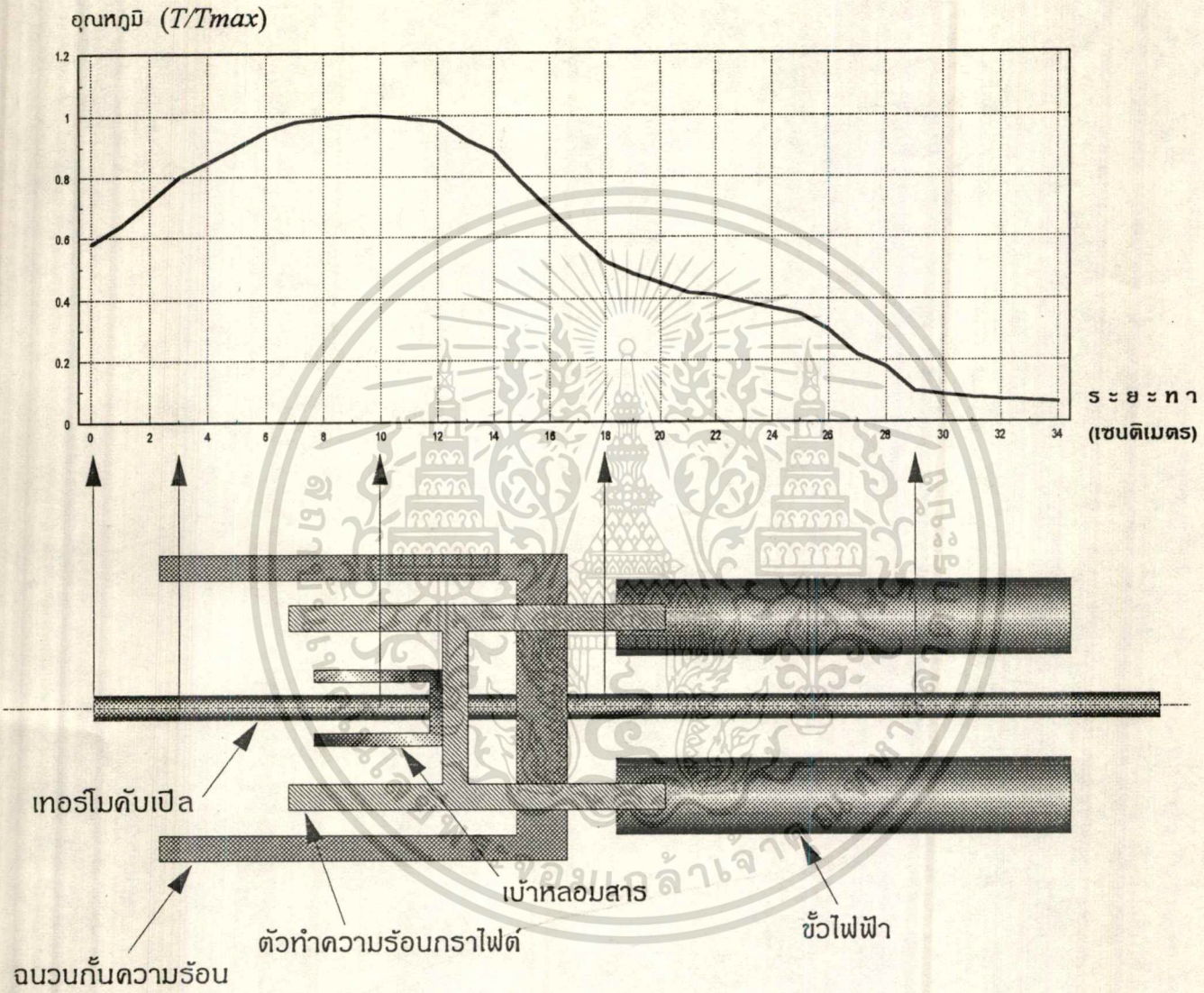
$I_1V_1 - I_2V_2$ = 394.15 วัตต์

จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับตัวทำความร้อนน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในตัวหม้อแปลงเองซึ่งทำให้หม้อแปลงร้อนมากขึ้น ๆ ดังนั้นที่อินพุทของหม้อแปลงไฟฟ้าเท่ากับ 50 VAC จึงหยุดการทดลอง

ผลของอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลอันที่หนึ่ง (profile) เป็นดังรูปที่ 6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

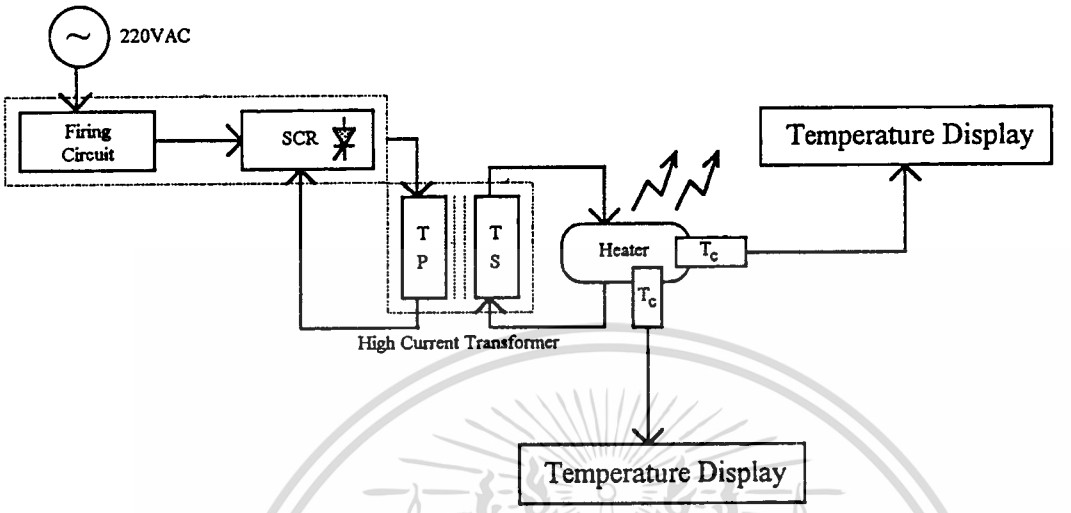
จากข้อมูลของอุณหภูมิที่ได้นำมาเขียนกราฟ T/T_{max} ได้ดังนี้
(เปรียบเทียบกับระยะภายในห้องปลูกผลึกที่อัตราส่วนเดียวกัน)



รูปที่ 6.2 แสดงกราฟของการตรวจวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในห้องปลูกผลึก
โดยไม่มีการควบคุมด้วยเครื่องอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองครั้งที่หนึ่งทำให้ทราบถึงปัญหาเรื่องหม้อแปลงไฟฟ้าดังนั้นจึงพิจารณาทำหม้อแปลงตัวใหม่ดังที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทที่ 5. จากนั้นนำหม้อแปลงไฟฟ้าตัวใหม่เป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูงมาทำการทดลองการทำงานดังบล็อกไดอะแกรมข้างล่างนี้



รูปที่ 6.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมในการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูง โดยไม่มีการควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ

ข้อมูลเบื้องต้นก่อนทำการทดลองจ่ายกำลังไฟฟ้า

- หม้อแปลงไฟฟ้า 220 VAC-30 VAC.
- SCR* 800 V_{RRM} (* ดูรายละเอียดในภาคผนวก ง.)
- FIRING CIRCUIT** (** ดูรายละเอียดในภาคผนวก ง.)
- เทอร์โมคัปเปิลอันที่หนึ่ง (T_c1) ตรวจวัดอุณหภูมิภายในห้องปลูกผลึกที่ตำแหน่งใจกลางของตัวทำความร้อน
- เทอร์โมคัปเปิลอันที่สอง (T_c2) ตรวจวัดอุณหภูมิทางด้านข้างผิวด้านนอกของแผ่นโมลิบดินัม
- เทอร์โมคัปเปิลอันที่สาม (T_c3) ตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำขาออกของระบบหล่อเย็น
- ความดันสุญญากาศ 1×10^{-4} Torr.

ข้อมูลเมื่อทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับตัวทำความร้อนแล้ว

- หม้อแปลงไฟฟ้า อินพุท 85 VAC, 21.5 Amps.,
  เอาท์พุท 11.6 VAC, 154.5 Amps.
- T_c1 อ่านค่าของอุณหภูมิสูงสุดได้ 1,020 องศาเซลเซียส
- T_c2 อ่านค่าของอุณหภูมิสูงสุดได้ 480 องศาเซลเซียส
- T_c3 อ่านค่าของอุณหภูมิสูงสุดได้ 36 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดแสดงว่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในหม้อแปลงไฟฟ้าเท่ากับ

$P_1 - P_2$ = 1827.5-1792.2 วัตต์

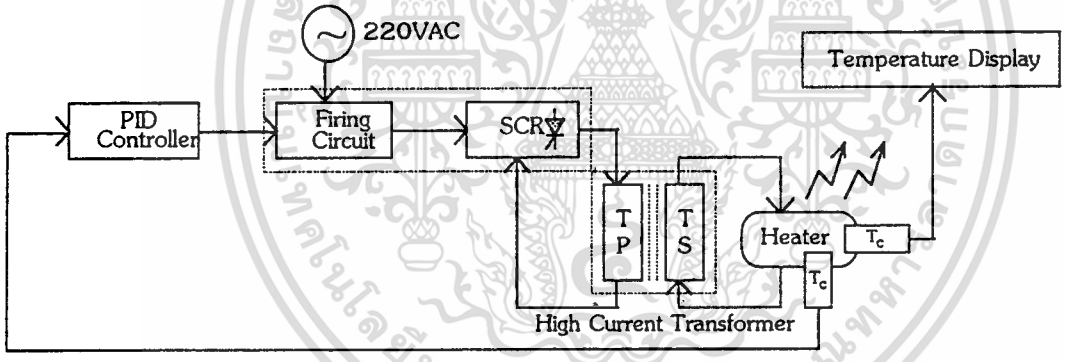
$I_1V_1 - I_2V_2$ = 35.3 วัตต์

จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในหม้อแปลงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับที่จ่ายให้กับตัวทำความร้อนและหม้อแปลงไฟฟ้าตัวใหม่ยังสามารถทำงานต่อไปได้ดี

ในการทดลองครั้งนี้ทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการควบคุมมุมทริกของเอสซีอาร์ได้โดยไม่ใช้เครื่องควบคุมพีไอดี พบว่าในการให้กำลังไฟฟ้าแก่ตัวทำความร้อนภายในห้องปลูกผลึกประมาณ 1.7 กิโลวัตต์ ทำให้บริเวณใจกลางของตัวทำความร้อนมีอุณหภูมิสูงถึง 1,020±2 องศาเซลเซียสภายในเวลาประมาณ 15 นาที

6.2 การตรวจวัดอุณหภูมิโดยมีการควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ (PID)

การดำเนินการทดลองจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับตัวทำความร้อนภายในห้องปลูกผลึกแสดงดังบล็อกไดอะแกรมข้างล่างนี้



รูปที่ 6.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมในการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูงโดยมีการควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ

จากบล็อกไดอะแกรมจะเห็นว่ามีการใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติแบบพีไอดี (PID) เพิ่มเข้ามาดังนั้นเทอร์โมคัปเปิลอันหนึ่งจะต้องต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติเพื่อทำการรับค่าอินพุทที่จุดควบคุมอุณหภูมิภายในเตาปลูกผลึก ในการใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิพีไอดีนั้นพีไอดีจะเป็นตัวจัดการในการรับค่าอินพุทแล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้รับการตั้งไว้ (set point) จากนั้นจึงส่งสัญญาณออกไปเข้าสู่วงจรไฟริ่งเพื่อทำการควบคุมระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เหมาะสมเพื่อจะทำให้อุณหภูมิที่จุดควบคุมเป็นไปตามที่ตั้งค่าไว้ การตั้งค่าพารามิเตอร์ให้พีไอดีและหลักการควบคุมกระบวนการดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก จ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลเบื้องต้นก่อนทำการทดลองจ่ายกำลังไฟฟ้า

- หม้อแปลงไฟฟ้า 220 VAC-30 VAC.
- SCR* 800 V_{RRM} (* ดูรายละเอียดในภาคผนวก ง.)
- FIRING CIRCUIT** (** ดูรายละเอียดในภาคผนวก ง.)
- เทอร์โมคัปเปิลอันที่หนึ่ง (T_c1) ตรวจวัดอุณหภูมิภายในห้องปลูกผลึกที่ตำแหน่งซึ่งอยู่ในแนวที่จะทำการดึงผลึก เริ่มต้นก่อนให้กำลังไฟฟ้าอ่านค่าได้ 34 องศาเซลเซียส
- เทอร์โมคัปเปิลอันที่สอง (T_c2) ตรวจวัดอุณหภูมิทางด้านข้างผิวด้านนอกของแผ่นโมลิบดินัม
- เทอร์โมคัปเปิลอันที่สาม (T_c3) ตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำขาออกของระบบหล่อเย็น
- ความดันสุญญากาศ 1×10^{-4} Torr.
- เครื่องควบคุมพีไอดี รุ่น UT37 YOKOGAWA

ค่าพารามิเตอร์ที่ตั้งไว้คือ

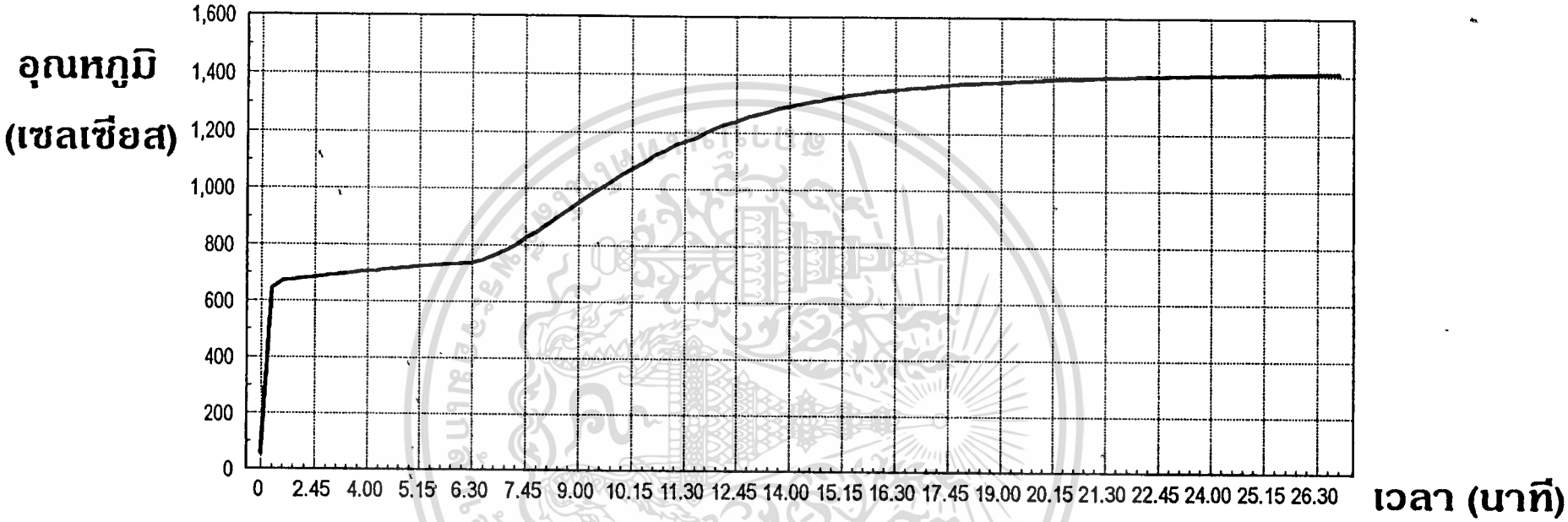
- SP 1412 °c (SP ≡ set point)
- P 5.0 % (P ≡ proportional band)
- I 240 sec (I ≡ integral time)
- D 60 sec (D ≡ derivative time)

ข้อมูลเมื่อทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับตัวทำความร้อนแล้ว (วัดที่สภาวะคงตัวของระบบ (steady state)

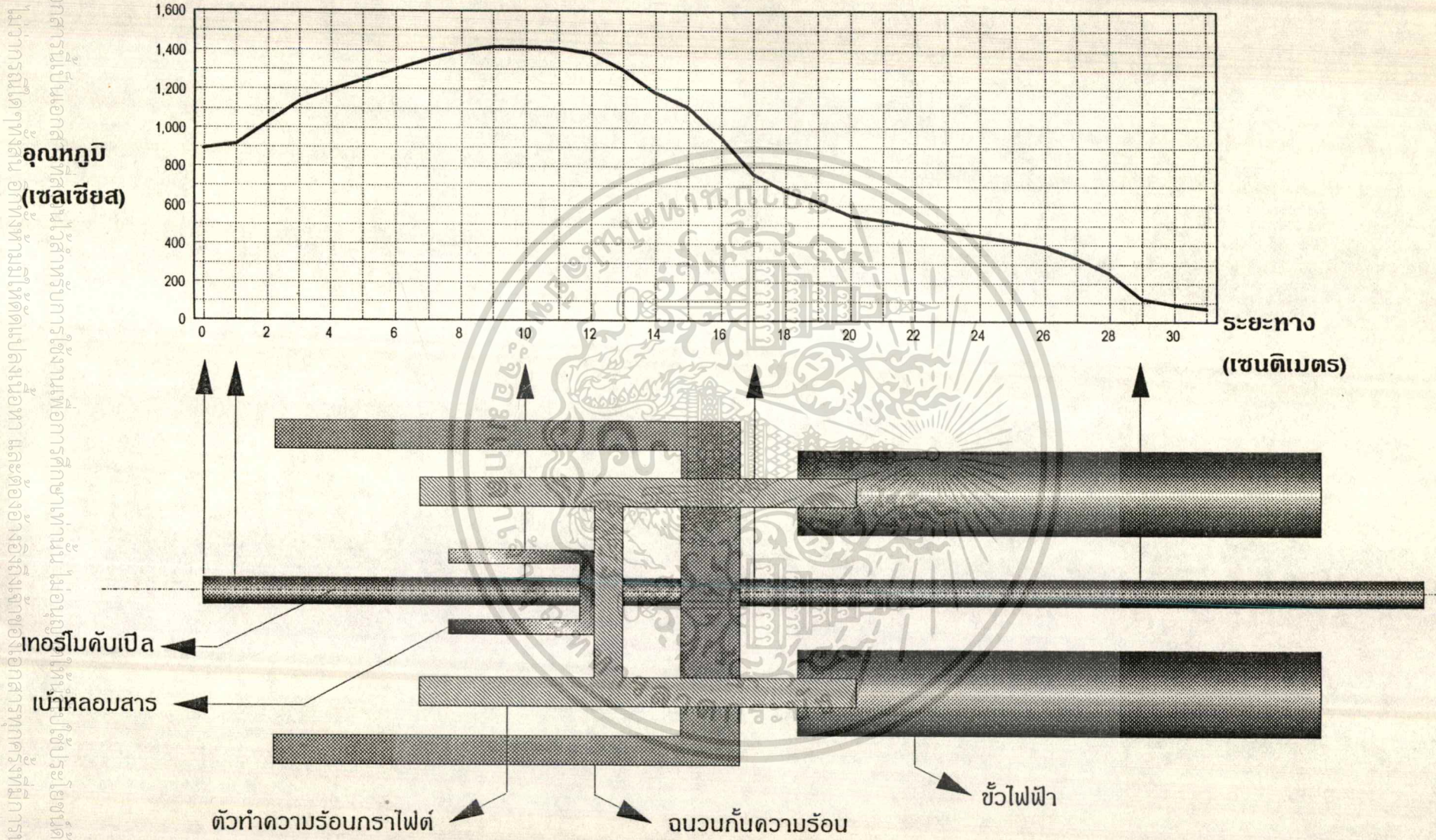
- หม้อแปลงไฟฟ้า อินพุท 178 VAC, 37.98 Amps., เอาท์พุท 23.2 VAC, 268 Amps.
- T_c1 อ่านค่าของอุณหภูมิสูงสุดได้ 1,412 ± 1 องศาเซลเซียส
- T_c2 อ่านค่าของอุณหภูมิสูงสุดได้ 441.6 องศาเซลเซียส
- T_c3 อ่านค่าของอุณหภูมิสูงสุดได้ 50 องศาเซลเซียส
- เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่อุณหภูมิควบคุม 30 นาที
- เวลาทั้งหมดที่ใช้จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว 40 นาที

รูปที่ 6.5 จะแสดงรูปกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวและรูปที่ 6.6 แสดงผลของอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลอันที่หนึ่ง (profile) เทียบกับระยะทางในแนวที่จะทำการดึงผลึกภายในห้องปลูกผลึก โดยเปรียบเทียบกับระยะภายในห้องปลูกผลึกที่อัตราส่วนเดียวกัน พบว่าจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที ในการที่ทำให้อุณหภูมิที่จุดควบคุมเข้าถึง 1,412 องศาเซลเซียส (set point) หลังจากนั้นอีกประมาณ 10 นาที ระบบก็เข้าสู่สภาวะคงตัวโดยมีอุณหภูมิ 1,412 ± 1 องศาเซลเซียส และจากรูป 6.6 พบว่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ภายในบริเวณเบ้าหลอมสารและมีความคงที่ของอุณหภูมิบริเวณนี้เป็นระยะ 2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 แสดงกราฟของการตรวจวัดอุณหภูมิในแนวที่จะดึงผลึกกับเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว

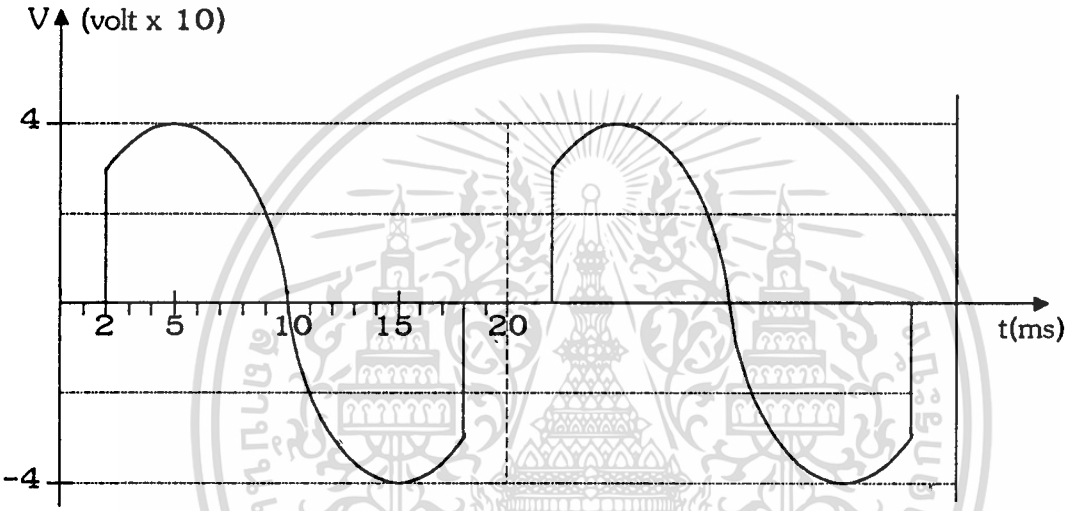


รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในแนวที่จะดึงผลึกกับระยะทางภายในห้องปลูกผลึกที่สภาวะคงตัว

ที่สภาวะคงตัวของระบบได้ทำการวัดอัตราการไหลของระบบหล่อเย็นได้ผลดังนี้

- อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนมีค่าเท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อวินาที
- อัตราการไหลของน้ำจากเครื่องทำความเย็นมีค่าเท่ากับ 33.33 มิลลิลิตรต่อวินาที
- อัตราการไหลของน้ำธรรมดาจากก๊อกมีค่าเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อวินาที

จากการทดลองโดยการตรวจจับสัญญาณที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูง พบว่าที่ระบบอยู่ในสภาวะคงตัวมีลักษณะรูปสัญญาณเป็นดังรูปที่ 6.7 ซึ่งจะเห็นว่าสัญญาณที่เข้าสู่ตัวทำความร้อนถูกทริกสัญญาณด้านบวกที่มุม $\pi/10$ และสัญญาณด้านลบที่มุม $19\pi/10$ ดังแสดงในรูป



รูปที่ 6.7 แสดงลักษณะรูปสัญญาณที่เข้าสู่ตัวทำความร้อนโดยวัดที่สภาวะคงตัวของระบบที่อุณหภูมิ 1,412 °c

นำค่าที่อ่านได้จากรูปสัญญาณในรูปที่ 6.7 มาทำการคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ตัวทำความร้อนได้รับ จากสูตร

$$P = \frac{1}{2\pi}\int_{\pi/10}^{19\pi/10} \frac{A^2}{R}\sin^2 \omega t\, d(\omega t)$$

$$= \frac{40\times 40}{0.16}\times\left\{\frac{1}{\pi}\left\{\left(\frac{\sqrt{5}}{8}-\frac{1}{8}\right)\cos\left(\frac{\pi}{10}\right)\right\}+\frac{9}{20}\right\}$$

$$= 4967.75 \qquad W$$

$$= 4.96775 \qquad kW$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายความว่าสำหรับระบบปลูกผลึกแบบโซคราลสกีที่พัฒนาขึ้นมา (ตามสิ่งแวดล้อมของระบบดังที่กล่าวมาแล้วทั้งหมด) จะต้องใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 4.97 กิโลวัตต์ จึงทำให้อุณหภูมิที่จุดควบคุมสูงถึง 1,412 องศาเซลเซียส (ตำแหน่งกึ่งกลางตัวทำความร้อนกราไฟต์) อย่างไรก็ตามหากสิ่งแวดล้อมของระบบเปลี่ยนแปลงไปแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีอยู่ก็เพียงพอที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ตัวทำความร้อนกราไฟต์เพื่อให้ได้อุณหภูมิสูงถึง 1,412 องศาเซลเซียส หรือสำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการปลูกผลึกรูปเดี่ยวของซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
บทสรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

7.1 สรุป

ในการทำชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชั้นสูงต่าง ๆ ต้องใช้ผลึกรูปเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ มาเป็นตัวกำหนดการทำงาน สารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ สารกึ่งตัวนำซิลิกอน และการที่จะได้มาซึ่งผลึกรูปเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนนั้นต้องอาศัยวิธีที่เรียกว่าการปลูกผลึก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอถึงรายละเอียดในการพัฒนาสร้างระบบปลูกผลึกขึ้นเรียกว่า ระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกี ซึ่งเป็นระบบที่นิยมใช้สำหรับการปลูกผลึกรูปเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนเพราะสามารถมองเห็นการทำงานได้ด้วยตาเปล่า สามารถปรับปรุงการควบคุมให้สมบูรณ์แบบยิ่งขึ้นได้ และได้แท่งผลึกที่มีขนาดใหญ่

การสร้างระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกีต้องคำนึงถึงสิ่งจำเป็นในการปลูกผลึก

- สิ่งที่จะทำความร้อนให้กับสารเพื่อหลอมเหลวและการควบคุมอุณหภูมิของสารหลอมเหลวนั้น
- สิ่งที่จะใช้บรรจุสารหลอมเหลว
- สิ่งที่จะใช้เป็นตัวจับผลึก ตัวหมุน และตัวดึงผลึกขึ้น
- สิ่งที่จะใช้ควบคุมความ ดันบรรยากาศภายในบริเวณปลูกผลึก

และกฎเกณฑ์ที่จะทำให้การปลูกผลึกประสบความสำเร็จได้นั่นคือ

1. ผลึกจะต้องหลอมละลายกลายเป็นสารหลอมเหลวเนื้อเดียวกันทั้งหมดในเบ้าหลอม โดยปราศจากสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ ไม่เช่นนั้นผลึกที่ปลูกได้จากสารหลอมเหลวที่ไม่บริสุทธิ์อาจจะมีเสถียรภาพบางจุดเท่านั้น

2. ผลึกไม่ควรมีปฏิกิริยากับเบ้าหลอมหรือกับบรรยากาศตลอดการดึง ซึ่งในระบบปิดที่มีกาซเฉื่อยอยู่ การเกิดออกซิไดซ์หรือการเกิดปฏิกิริยากับบรรยากาศจะไม่มีผล

3. จุดหลอมเหลวของสารที่ใช้ควรจะอยู่ในขอบเขตที่ตัวทำความร้อนสามารถทำได้และควรจะต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเบ้าหลอมด้วย

4. ควรจะมีการควบคุมอัตราการดึงและเกรเดียนท์ (gradient) ของอุณหภูมิไว้จุดที่ซึ่งผลึกเดี่ยวสามารถก่อตัวได้

ดังนั้นในการพัฒนาสร้างระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกีขึ้นมาจึงประกอบไปด้วยส่วนสำคัญต่าง ๆ ดังนี้คือ ห้องปลูกผลึก ระบบหล่อเย็น ตัวทำความร้อนและฉนวนกั้นความร้อน ระบบก๊าซเฉื่อย ระบบปั๊มสุญญากาศ ระบบหมุนและดึงผลึก ระบบควบคุมอุณหภูมิ ตัวจ่ายกำลังไฟฟ้า ได้ทำการทดลองตรวจวัดอุณหภูมิในแนวที่จะดึงผลึก โดยมีการควบคุมด้วยระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมอัตโนมัติแบบพีไอดี ดังนั้นที่อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนพบว่า ในเวลา 40 นาที อุณหภูมิภายในห้องปลูกผลึกอยู่ในสภาวะคงตัวและมีอุณหภูมิในแนวที่จะดึงผลึกเป็นดังรูปที่ 6.6 ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุด 1,412 องศาเซลเซียสและมีความคงที่ของอุณหภูมิเป็นระยะทาง 2 เซนติเมตร ในบริเวณปลูกผลึก โดยใช้กำลังไฟฟ้าในการทำความร้อน 4.97 กิโลวัตต์ และมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วง 1,412 $\pm$ 1 องศาเซลเซียส

7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

เนื่องจากเป็นงานที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการสร้างและพัฒนา ปัญหาในการทำงานส่วนใหญ่เป็นเรื่องของวัสดุ อุปกรณ์และการทำให้ได้ชิ้นส่วนตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ เพราะส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่หาได้ในเมืองไทยเพื่อประหยัดเงินเวลาในการสั่งซื้อ ความล่าช้าอีกประการหนึ่งคือค่อนข้างจะใช้เวลามากและมีความรอบคอบสูงในการทำชิ้นส่วนทุก ๆ ชิ้นเพื่อจะให้ทุกส่วนประกอบเข้ากันได้ทั้งชิ้นส่วนที่มีอยู่แล้วและที่ทำขึ้นมาใหม่ ปัญหาอีกอันหนึ่งก็คือเรื่องของการทำให้ระบบเป็นสุญญากาศ ดังนั้นทุกชิ้นส่วนที่ประกอบเข้ากับห้องปลูกผลึกจะต้องมีการซีลที่ส่วนข้อต่อเป็นอย่างดีโดยใช้วัสดุที่ต้องทนความร้อนสูงและมีระบบหล่อเย็นที่ดีมากเพื่อจะได้มีระยะเวลาในการทำงานของระบบยาวขึ้นและป้องกันความเสียหายของวัสดุที่ใช้

การระมัดระวังในเรื่องของการประกอบชิ้นส่วนโดยเฉพาะกราไฟต์ ในเรื่องของการสัมผัส การกระทบกระเทือน เพราะหากเกิดการแตกหัก เสียหาย จะต้องใช้เวลาในการสั่งซื้อจากต่างประเทศนานพอสมควร สิ่งที่สำคัญยิ่งอีกประการหนึ่งคือ การขาดวัสดุ อุปกรณ์ ที่จำเป็นในการปลูกผลึกเพื่อให้ได้ผลึกจริง ๆ อย่างเช่น เม็ดผลึก สารกึ่งตัวนำซิลิกอนบริสุทธิ์ สเตปปิ้งมอเตอร์ชนิดไมโครสเตป ซึ่งมีจำนวนสเตปละเอียดสูงมาก ๆ ในหนึ่งรอบเพื่อลดการสั่นของแท่งดึงผลึก สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ต้องหาซื้อจากต่างประเทศซึ่งต้องใช้เงินและเวลามากพอสมควร

7.3 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

เนื่องจากสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ตามความเป็นจริงแล้วนั้น จะถูกนำไปใช้สร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor devices) ได้น้อยเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบ ทั้งนี้เนื่องจากสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์มีสภาพความนำไฟฟ้าต่ำและมีค่าคงที่ สำหรับแต่ละชนิดของสารกึ่งตัวนำ สภาพความนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงได้เฉพาะกรณีที่ได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก เช่นความร้อนหรือแสง เป็นต้น การควบคุมค่าความนำไฟฟ้าจึงทำได้ยากและลำบาก

ดังนั้นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์เมื่อถูกเติมด้วยสารเจือ (impurity) แล้วสภาพความนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้มากน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเจือที่เติมลงไป การควบคุมสารเจือเรียกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การโด๊ป (doping) ปริมาณสารเจือที่เติมลงไปในสารกึ่งตัวนำถึงแม้ว่าจะมีจำนวนน้อยมากแต่จะมีผลทำให้ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงอย่างมาก สารกึ่งตัวนำชนิดที่เติมสารเจือลงไปนั้นได้แบ่งออกเป็นสองชนิดคือ ชนิดเอ็น (n-type) และชนิดพี (p-type)

ถึงแม้ว่าการเตรียมสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบให้อยู่ในสภาพผลึกรูปเดี่ยวที่สมบูรณ์และมีคุณภาพดี จะเป็นเรื่องยุ่งยากและลำบากกว่าการเตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ก็ตาม แต่ประโยชน์ที่ได้รับจากสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบนั้นก็มีมากมาย เช่น มีช่องว่างพลังงานที่กว้างขึ้น ค่าความคล่องตัวของพาหะก็สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเลือกชนิดของสารประกอบ ค่าของช่องว่างพลังงานและค่าความคล่องตัวมีความสำคัญมากต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

ดังนั้นจึงขอเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาสำหรับระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกีที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมาแล้วดังต่อไปนี้

1. ในส่วนของห้องปลูกผลึกได้ออกแบบให้มีช่องที่ติดข้อต่อเอาไว้สำหรับทำเป็นช่องเติมสารเจือ ดังนั้นจึงสามารถพัฒนาให้มีส่วนเติมสารเจือลงไปในการปลูกผลึกได้

2. ในส่วนของแท่งดึงผลึก จะต้องมีส่วนที่ใช้จับเม็ดผลึกให้อยู่นิ่งคงที่ตามขนาดของเม็ดผลึกที่ใช้ ซึ่งต้องมีการออกแบบและสร้างขึ้นต่อไป การควบคุมควรจัดหาไมโครสเตปปิ้งมอเตอร์ที่มีจำนวนสเตปสูงมาก ๆ

3. สำหรับระบบการหล่อเย็นด้วยน้ำธรรมดาก็ควรเปลี่ยนเป็นการหล่อเย็นด้วยน้ำที่ผ่านเครื่องทำความเย็น ดังนั้นต้องจัดหาเครื่องทำความเย็นและที่เก็บน้ำเย็นที่เพียงพอกับระบบและระยะเวลาในการทำงาน

4. ในส่วนของการควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้คงที่หรือมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดหรือไม่มีนั้น ต้องหาตัวควบคุมที่มีค่าความเที่ยงตรงสูง ๆ มาควบคุมซึ่งราคาค่อนข้างแพงมาก

5. จัดหาเม็ดผลึก สารเจือ และทดลองปลูกผลึก ในโอกาสต่อ ๆ ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

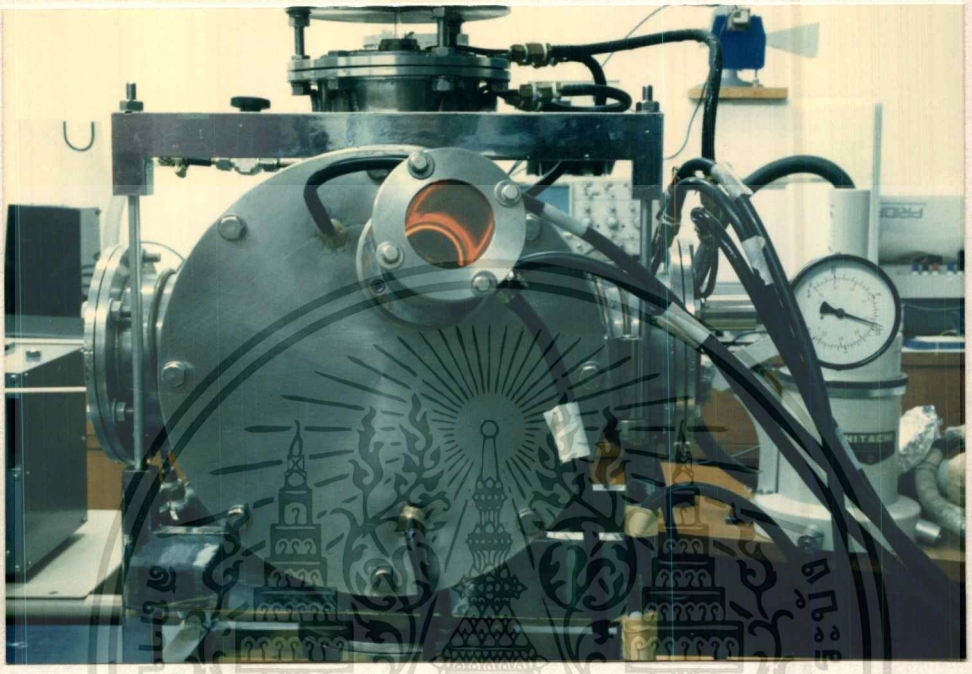
เอกสารอ้างอิง

1. นิศาพร เกียรติไพศาลโสภณ, ผศ. อนุพงศ์ สรงประภา, ผศ.ดร. เสน่ห์ เอกะวิภาต, การพัฒนาระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกี, หนังสือประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19, 2536.
2. ชูเกียรติ วัฒนากูล, อุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระโชก, วารสารเซมิคอนดัคเตอร์อิเลคทรอนิคส์, ฉบับที่ 193, กรกฎาคม 2532.
3. Brain., Pamplin, **Crystal Growth**, Volume 6, Pergamon Press, Oxford-Newyork-Toronto-Sydney, 1975.
4. E.T., Schonholzer, **Protection of Power Semi Conductor Devices**, Reprinted, February, 1988.
5. ET., SMCC, **Stepping Motor Control**, ETT. CO., LTD., 1992.
6. J.J., Gilman, Editor, **The Art and Science of Growing Crystals**, John Wiley & Sons, Inc., 1963.
7. Nick Holonyak, Jy., **Solid State Physical Electronics Series**, Englewood Cliffs, New Jersey, 1970.
8. k, Ogata, **Modern Control Engineering**, Pretrical-Hall of India Prirate Limit, New Delhi, 1984.
9. R.A. Laudise, **The Growth of Single Crystals**, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1970.
10. R.F., Strickland-Constable, **Kinetics and Mechanism of Crystallization**, A cademic Press, London and New York, 1968.
11. RS Data Library, **Power Controllers**, Issued March, 1990.
12. T. Kenjo, **Stepping Motor and Their Microprocessor Controls**, Clarendon Press, Oxford, 1984.
13. T.J., Johnson, **Temperature Controller**, Practical Electronics, Fabruary 1984.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

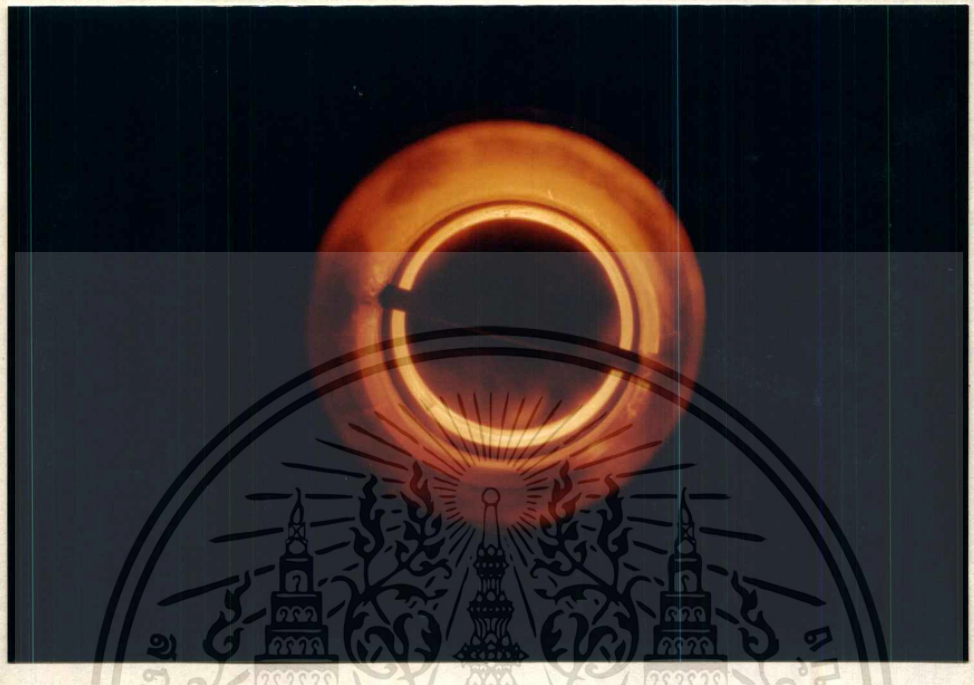
รูปแสดงระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกีที่พัฒนาขึ้น เมื่อมีอุณหภูมิภายในห้องปลูกผลึกเป็น 1,412 องศาเซลเซียส



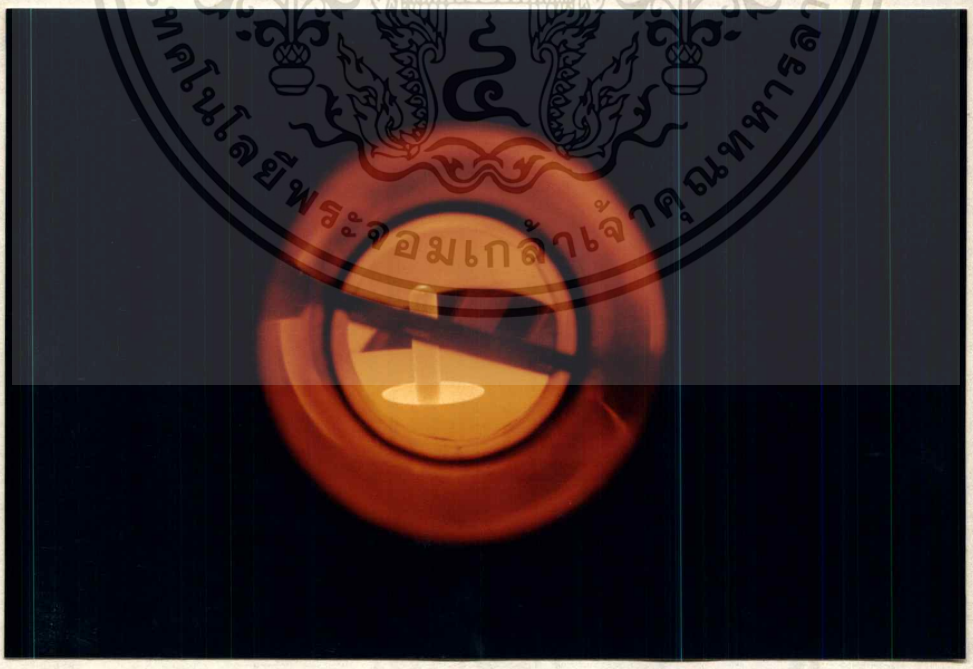
รูปที่ 1 แสดงลักษณะด้านหน้าของเครื่องต้นแบบขณะกำลังทำงาน

รูปที่ 2 แสดงเทอร์โมคับเปิลซึ่งอยู่ในแท่งแก้วควอทซ์ที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิภายในห้องปลูกผลึกในสภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

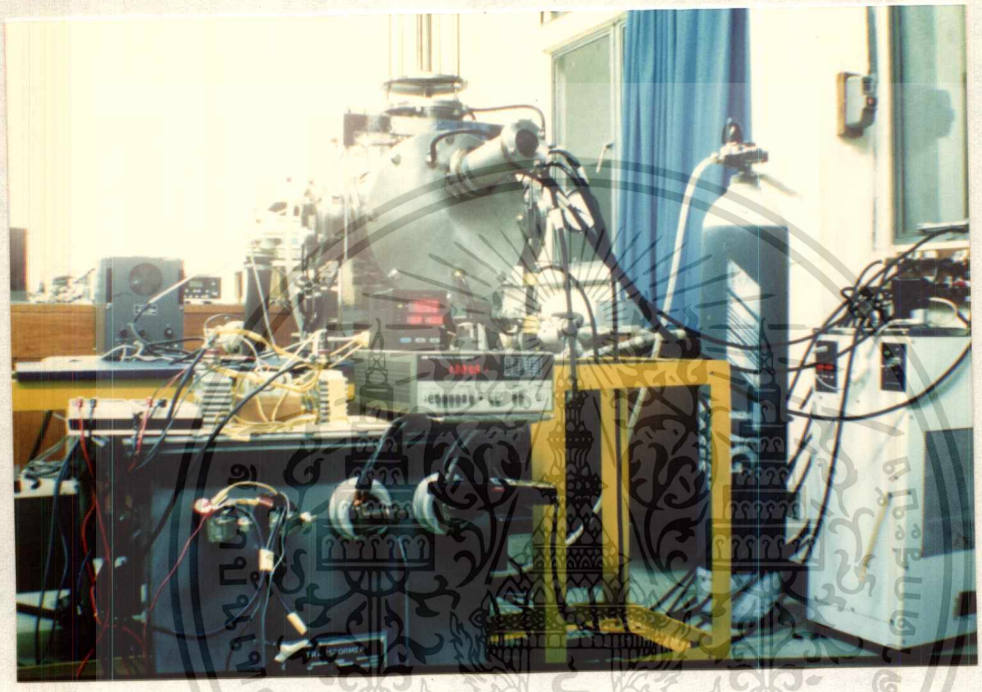


รูปที่ 3 แสดงลักษณะภายในห้องปลูกผลึก (ขณะปิดแผ่นสะท้อนรังสีความร้อน) เมื่อมองผ่านช่องมองจากแป้นด้านหน้า



รูปที่ 4 แสดงลักษณะภายในห้องปลูกผลึก (ขณะเปิดแผ่นสะท้อนรังสีความร้อน) เมื่อมองผ่านช่องมองจากแป้นด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

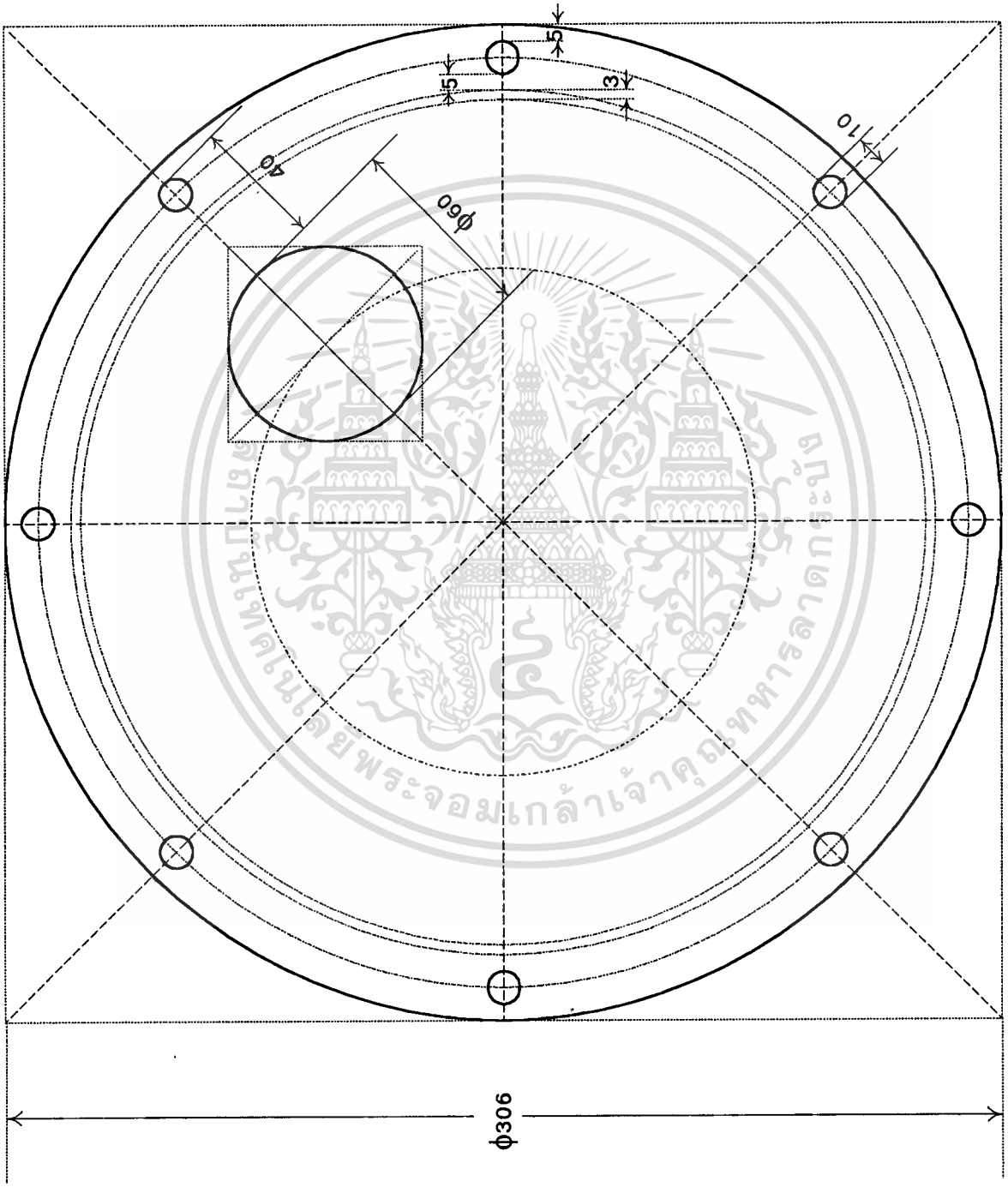


รูปที่ 5 แสดงระบบปลูกผลึกโดยรวมที่ได้พัฒนาขึ้น

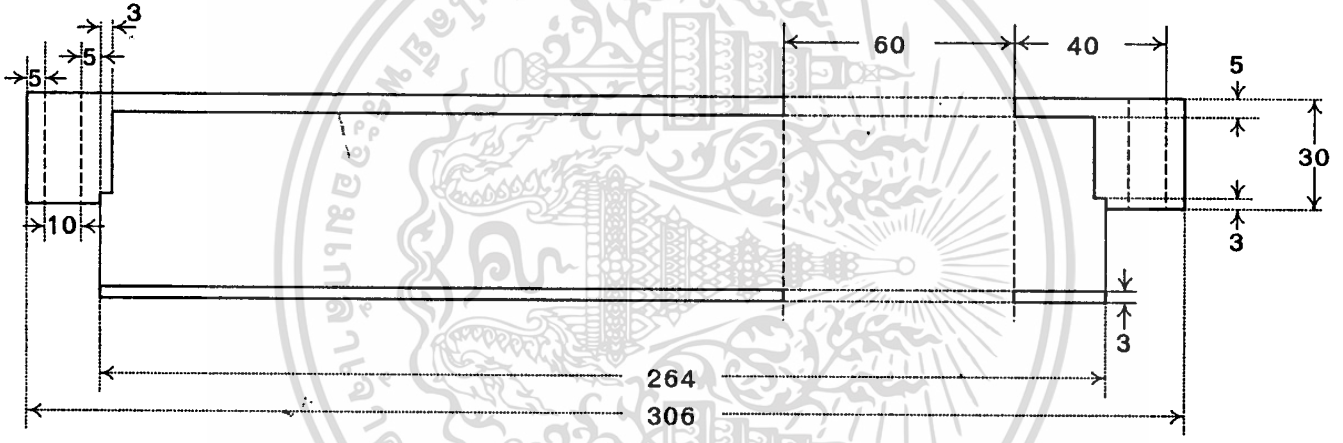
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
แบบแปลนของชิ้นส่วนในการสร้างระบบปลูกผลึก

TOP VIEW	ห้องปลูกผลึก	แป้นด้านหน้า	SCALE	UNIT
			1:2	mm.

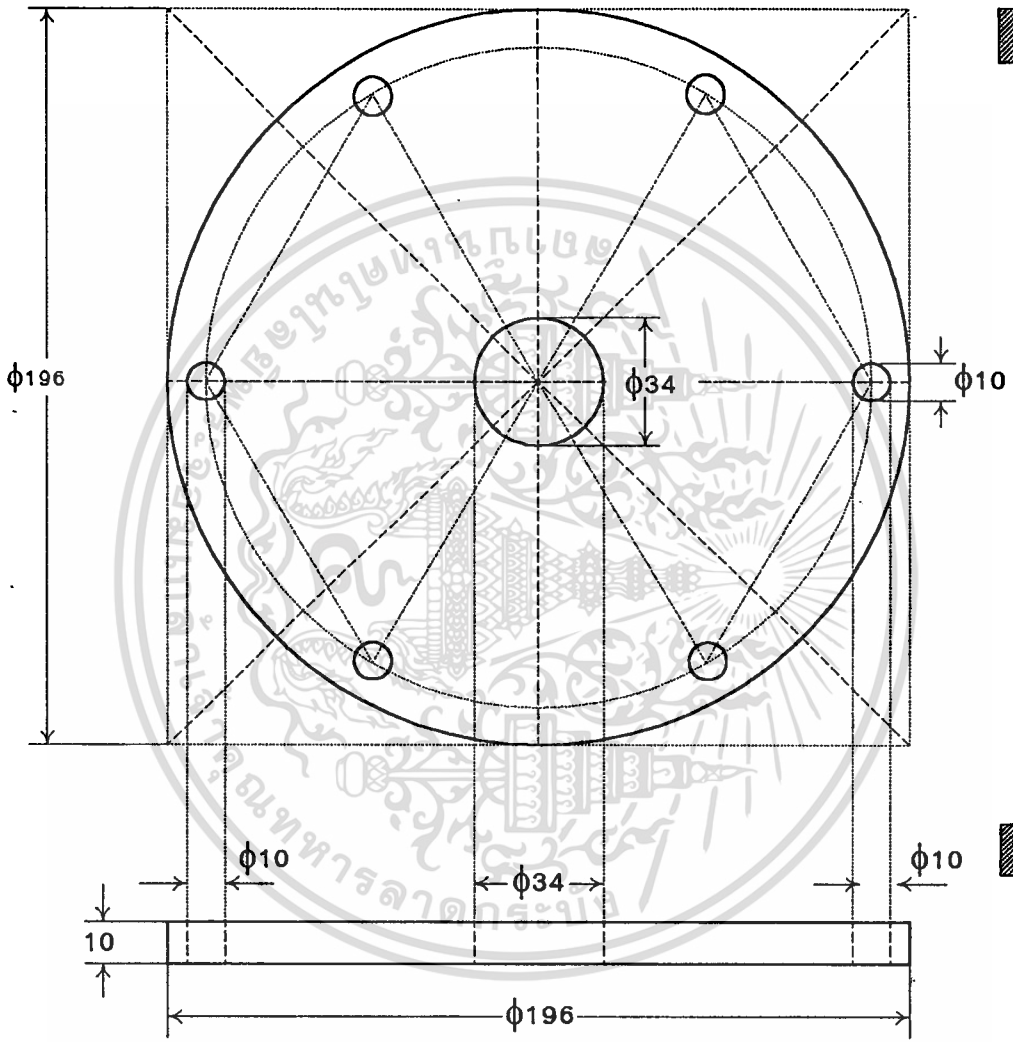


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

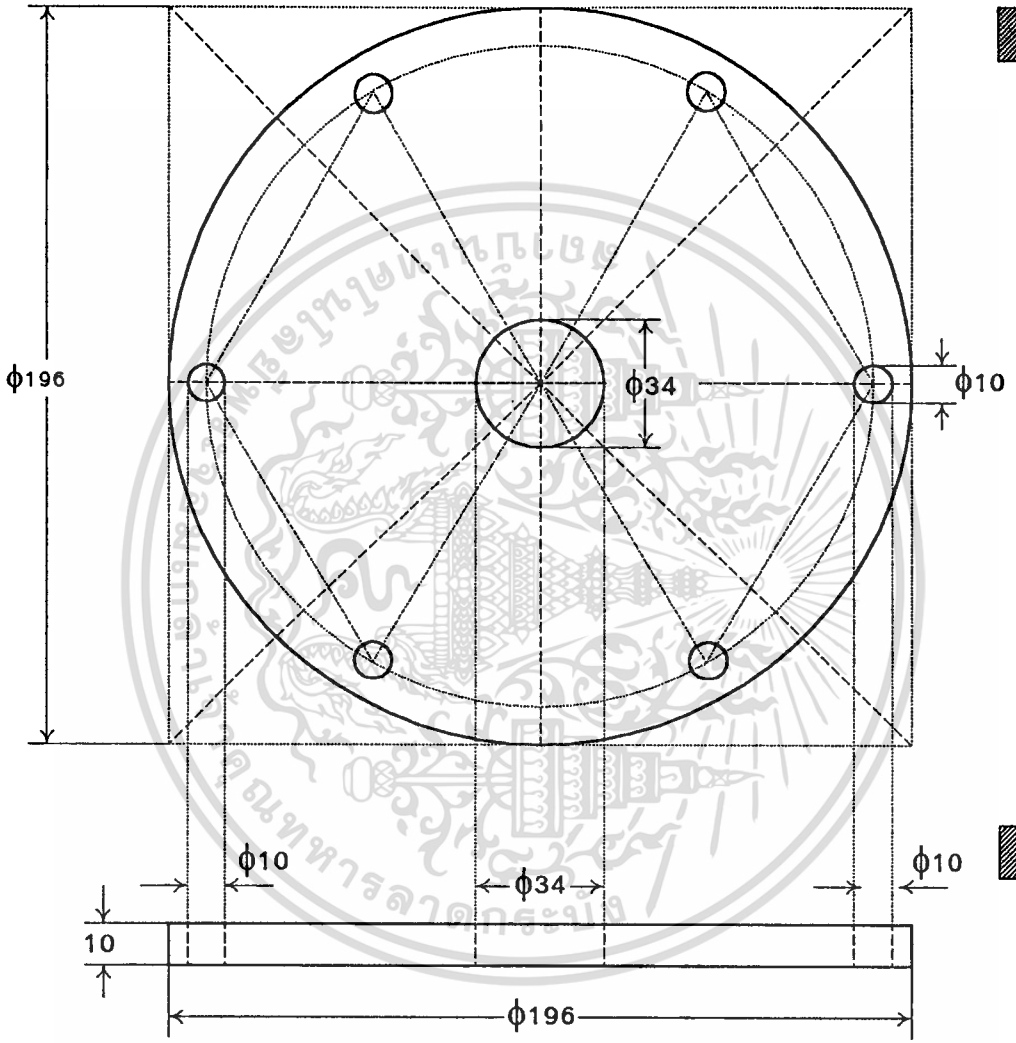


SIDE VIEW	
ห้องปลูกผลึก	
แป้นด้านหน้า	
SCALE	UNIT
1:2	mm.

ข-2

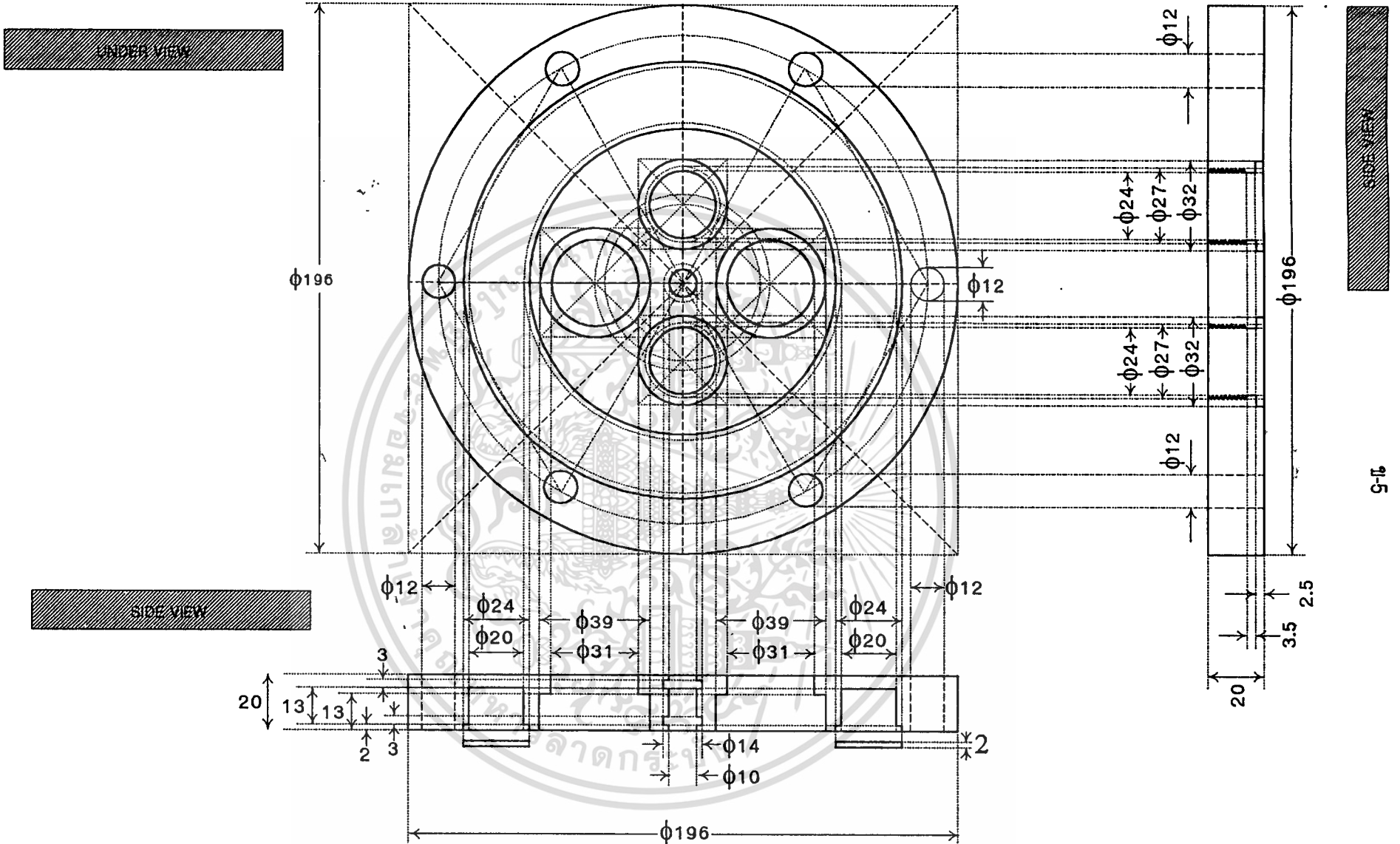


ห้องปลูกผลึก	
แป้นด้านบน	
SCALE	UNIT
1:2	mm.



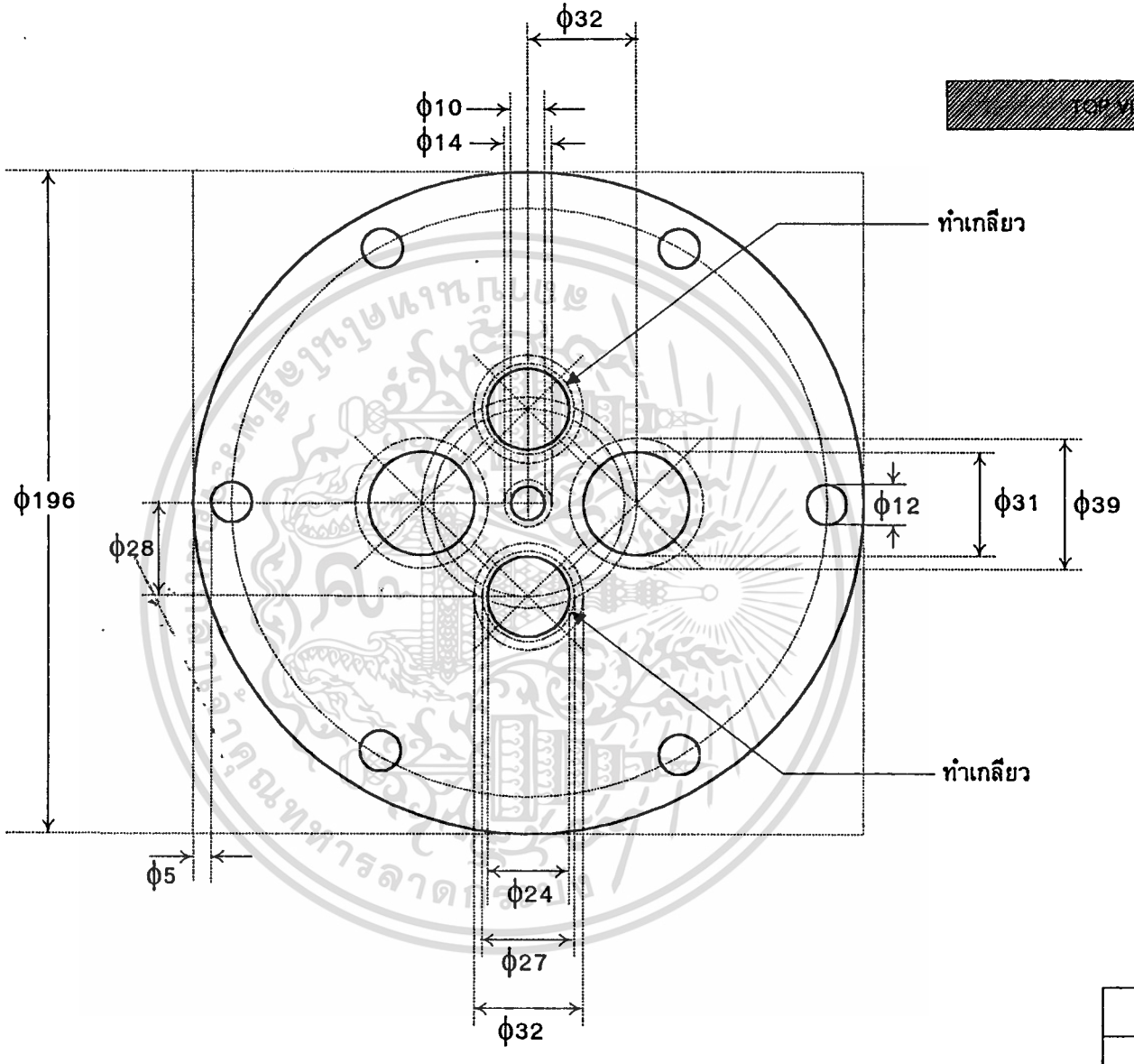
ข-4

ห้องปลูกผลึก	
แป้นด้านข้าง	
SCALE	UNIT
1:2	mm.



ห้องปลูกผลึก	
แป้นด้านล่าง	
SCALE	UNIT
1:2	mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



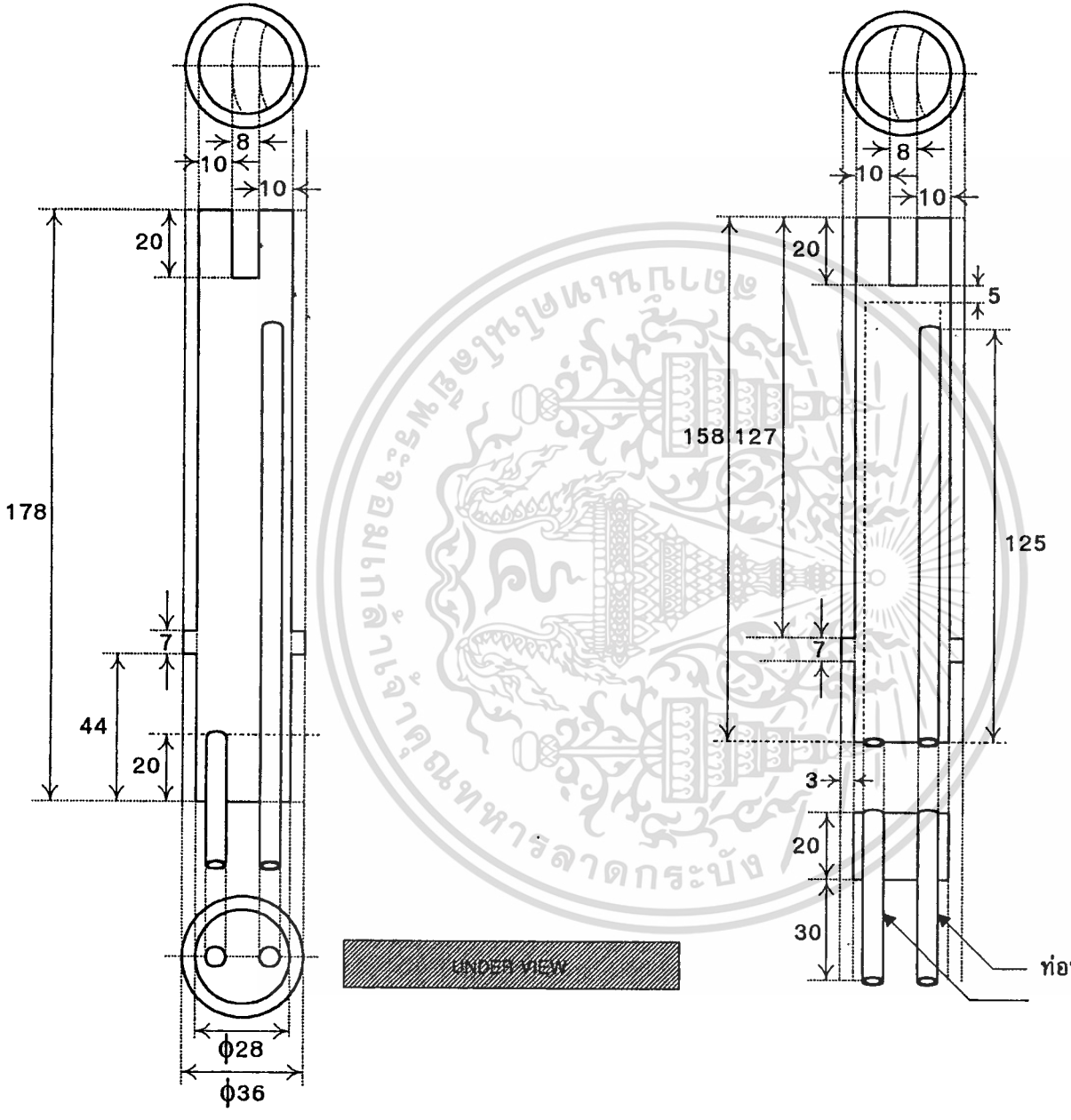
ห้องปลูกผลึก	
แป้นด้านล่าง	
SCALE	UNIT
1:2	mm.

TOP VIEW

SIDE VIEW

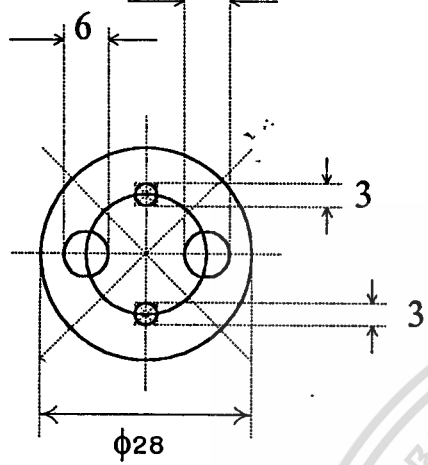
UNDER VIEW

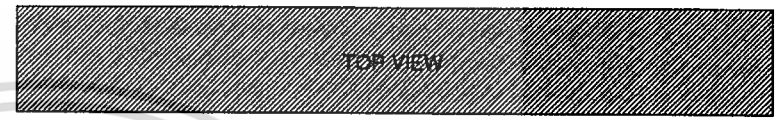
ฐานรองฉนวน	
Stainless Steel	
SCALE	UNIT
1:2	mm.

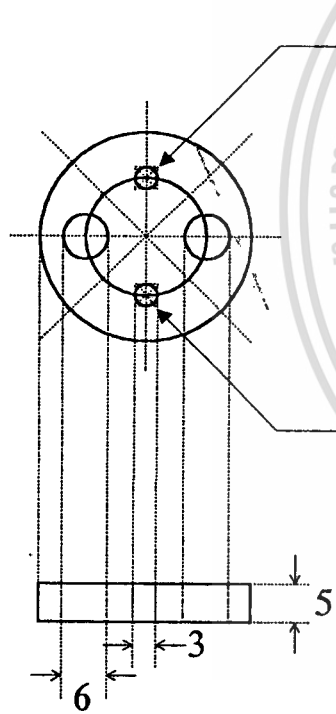


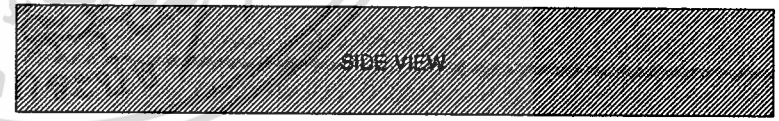
แท่งทองแดง	
SCALE	UNIT
1:2	mm.

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า



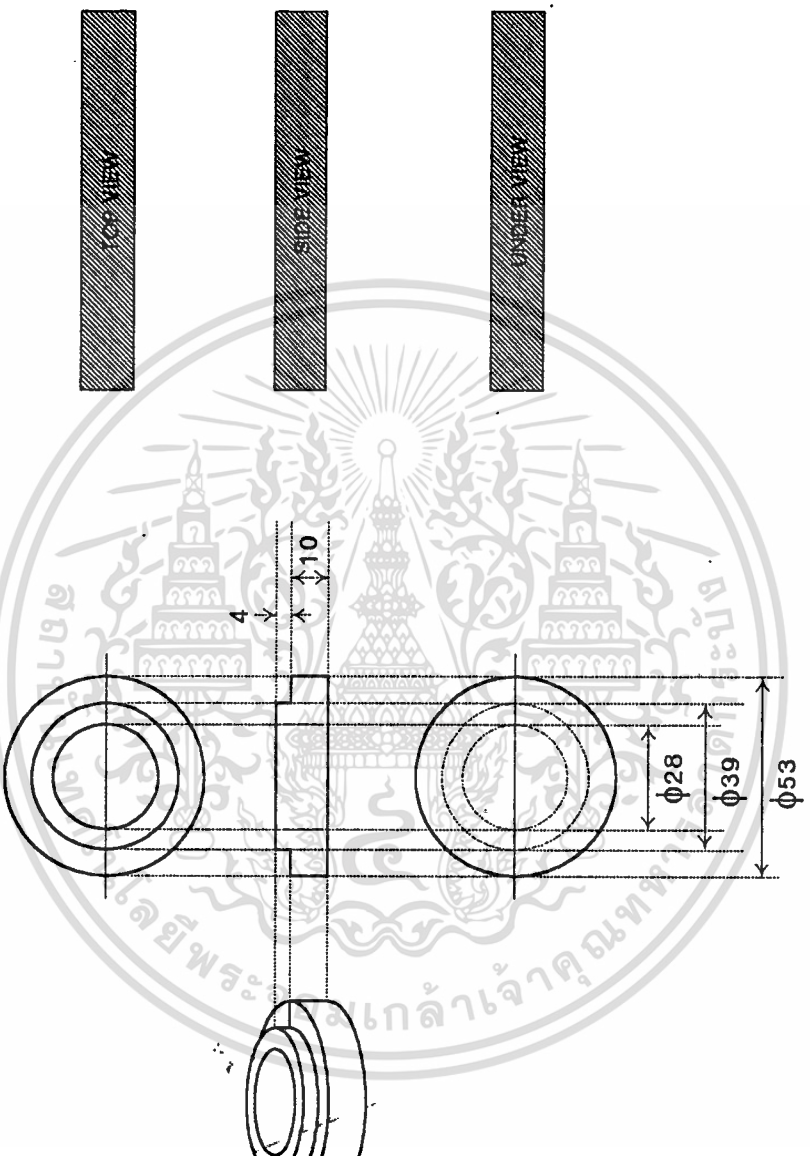






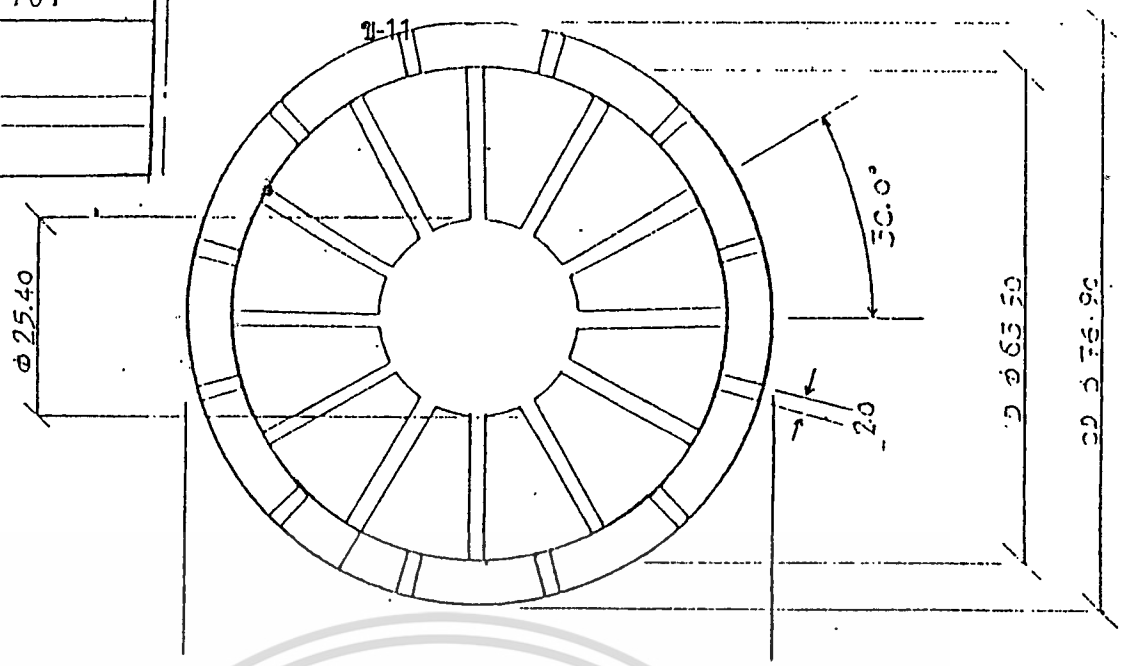
แผ่นทองแดง	
SCALE	UNIT
1:1	mm.

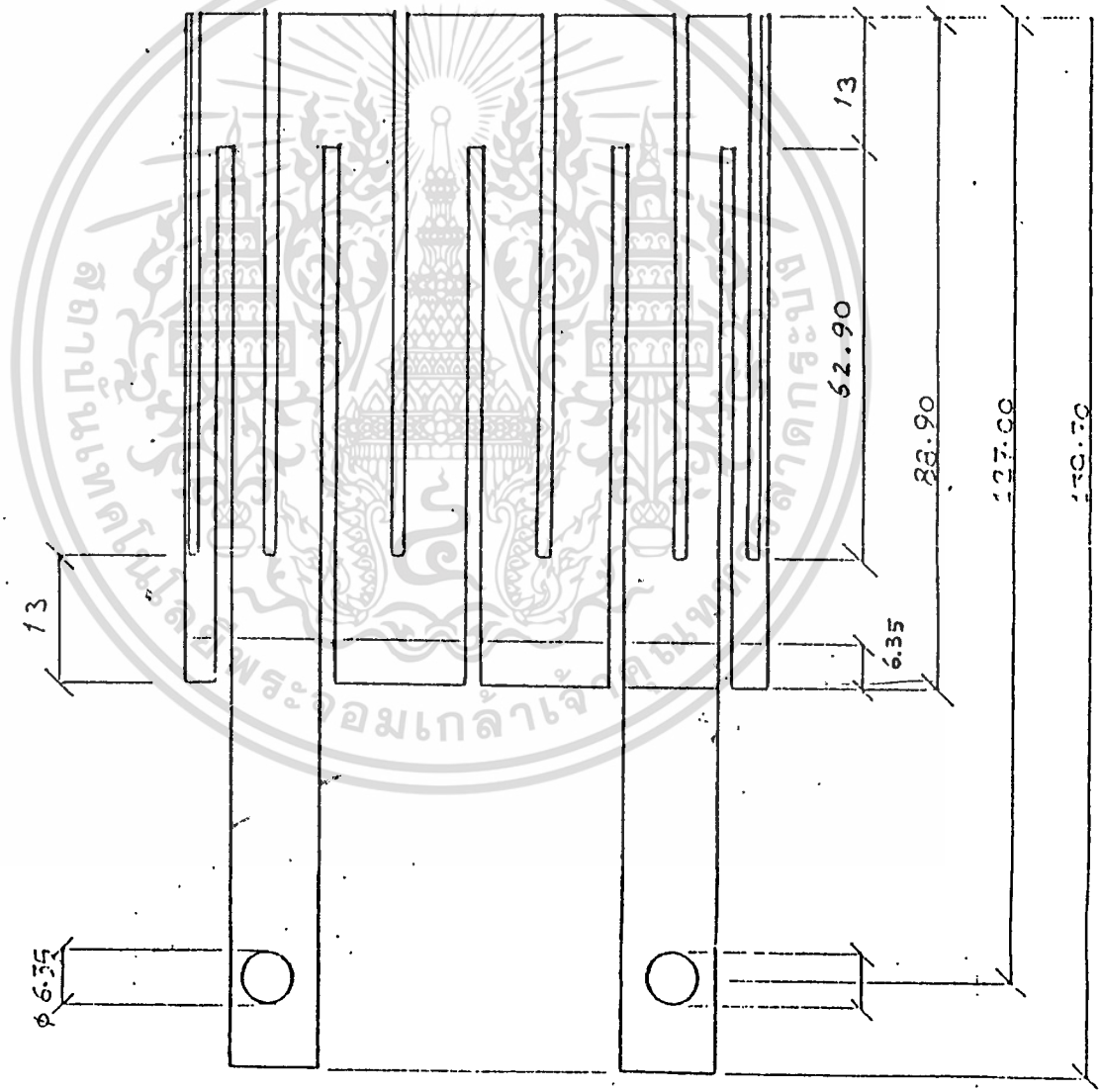
TEFLON RING		
SCALE	UNIT	
1:2	mm.	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CT REF	II/EX/101
REVISIONS	



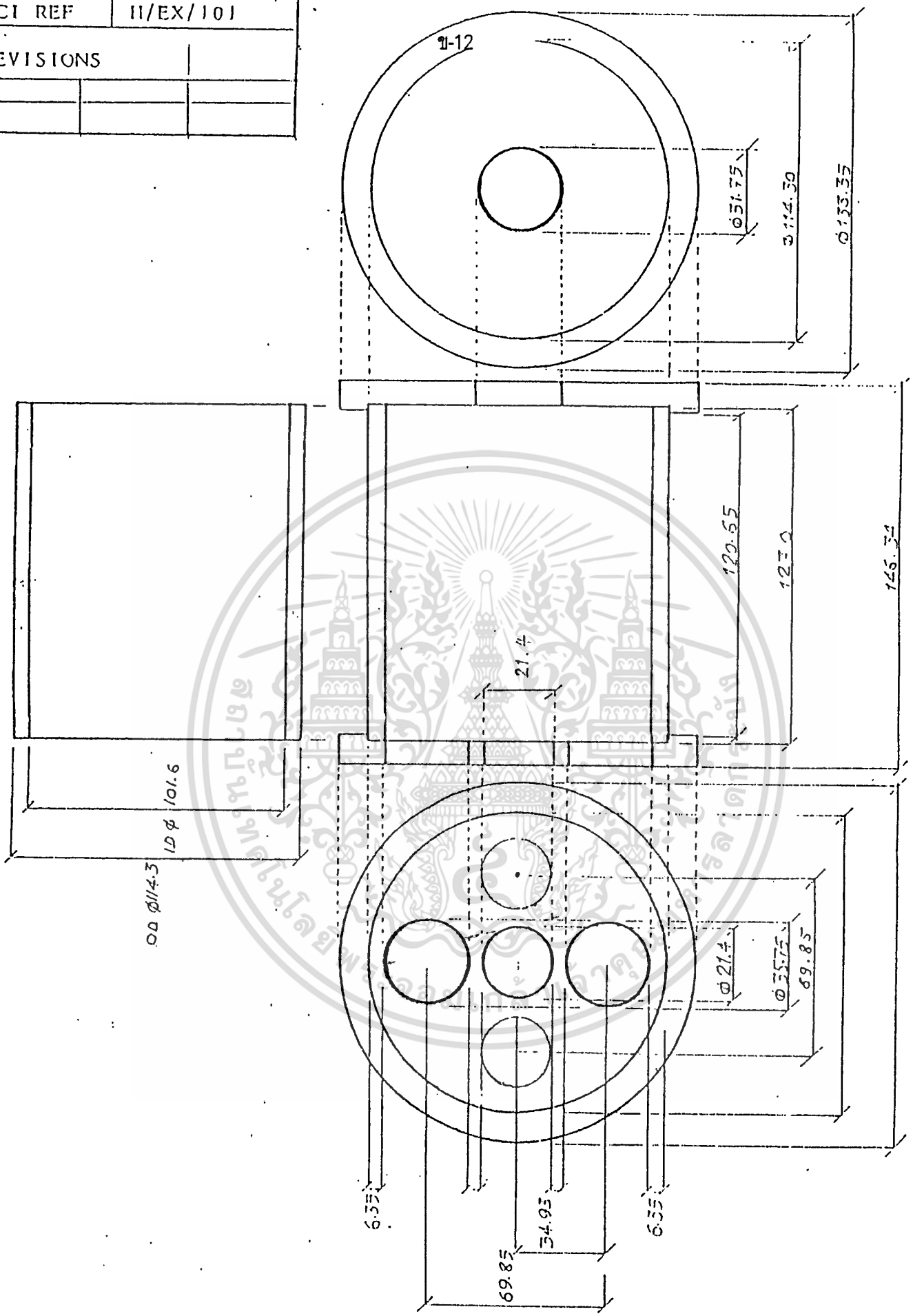


TITLE	GRAPHITE HEATER			
ALL DIMENSIONS ARE IN MM				
SCALE	DRAWN BY	CHKD BY	DATE	APPROVAL
1:1	S. Roy		15.6.1992	7.7.1992

POLYCARB
CARBON INDUSTRIES
PONDICHERRY 605 003
INDIA.

ลิขสิทธิ์ของหอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้ง

PCI REF	II/EX/101
REVISIONS	

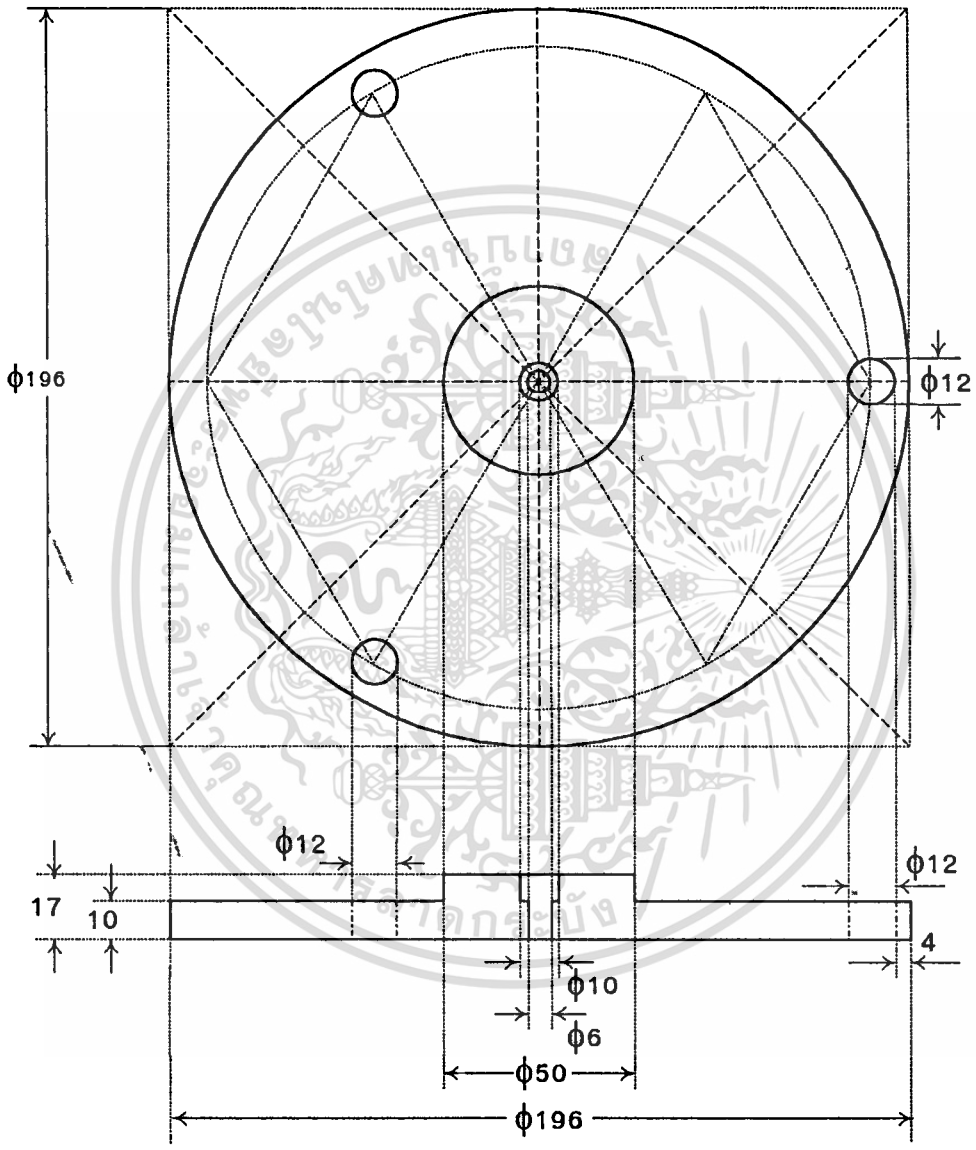


TITLE	GRAPHITE SHIELD & LIDS			
ALL DIMENSIONS ARE IN MM				
SCALE	DRWN BY	CHKD BY	DATE	APPROVAL
1:2	S.Roy		15.6.1992	A. ... 7.7.1992

PURE LUG
CARBON INDUSTRIES
PONDICHERRY 605. 003
INDIA.

PURE LUG
GRAPHITE

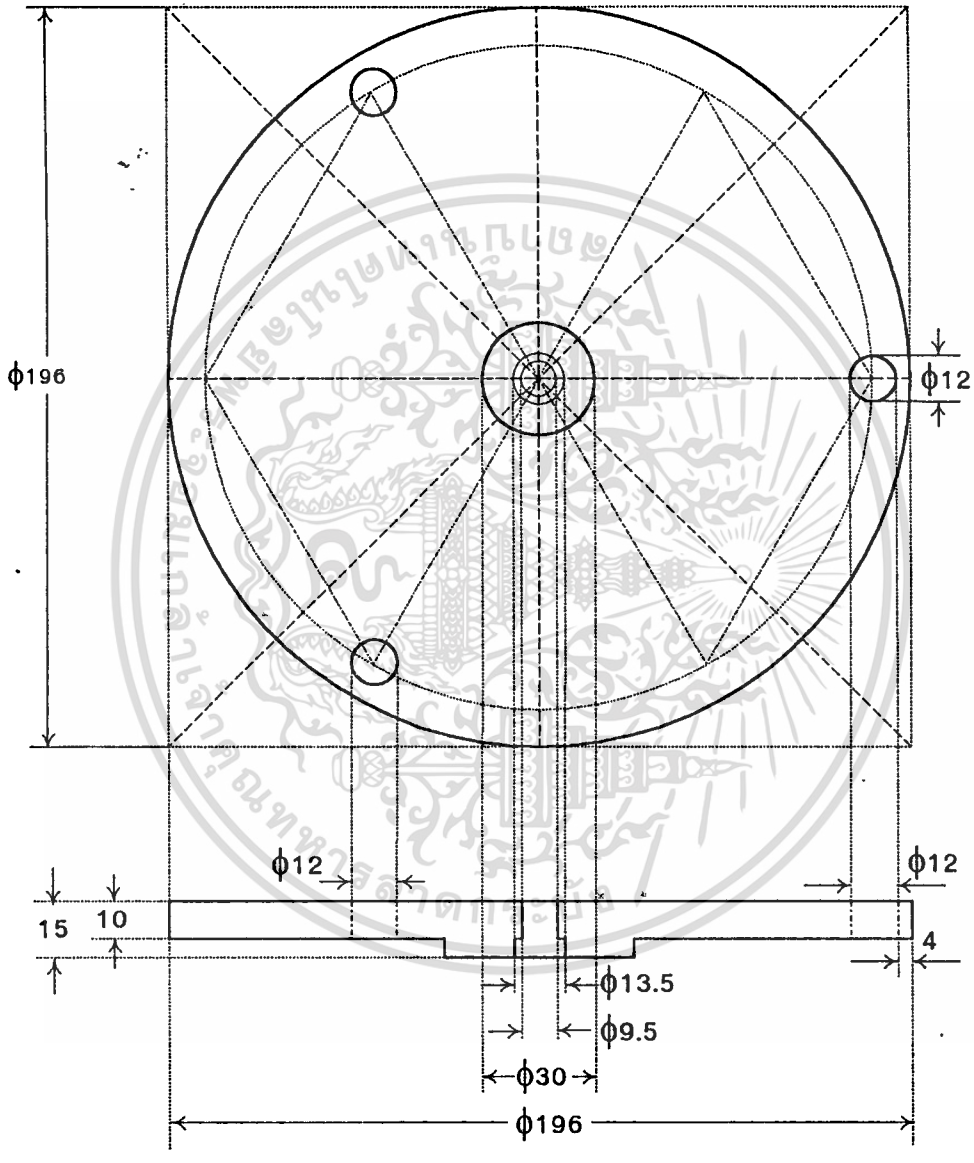
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ... เพื่อการศึกษาเท่านั้น ... ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ... ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ... และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ ...



ส่วนหัวดึงผลึก	
แป้นด้านล่าง	
SCALE	UNIT
1:2	mm.

ข-13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ส่วนหัวดึงผลึก	
แป้นด้านบน	
SCALE	UNIT
1:2	mm.

SIDE VIEW

ทำ 3 ชุด

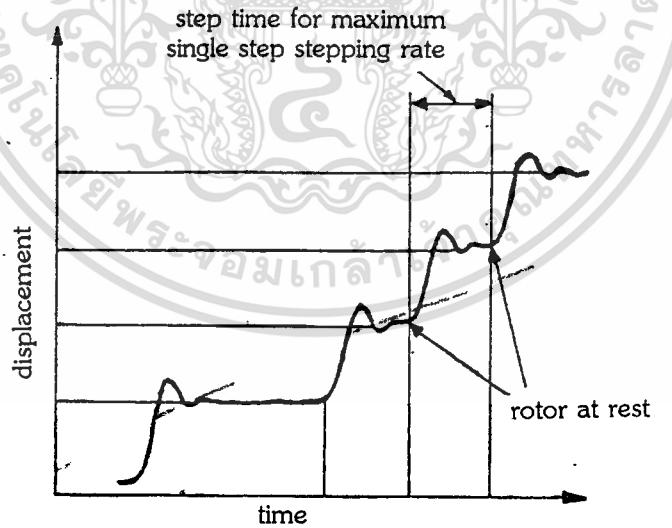
ข-1-15

ส่วนหัวดึงผลึก	
ขาตั้ง	
SCALE	UNIT
1:4	mm.

ภาคผนวก ค.
สเตปปิ้งมอเตอร์

การใช้สเตปปิ้งมอเตอร์

จากการที่สามารถออกแบบระบบควบคุมการหมุนของสเตปปิ้งมอเตอร์ได้โดยง่ายทำให้สเตปปิ้งมอเตอร์เป็นที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง แนวความคิดเกี่ยวกับการใช้งานของสเตปปิ้งมอเตอร์ในระบบควบคุมเริ่มเมื่อปี ค.ศ 1930 โดยนำไปประยุกต์ใช้เป็นอาวุธสงครามในราชนาวีอังกฤษ เช่นส่งท่อตอปิโดและฐานปืนใหญ่ แต่ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เครื่องมือ ระบบควบคุมการผลิต อุปกรณ์รอบนอกของเครื่องคอมพิวเตอร์ (periperal device) เช่น เครื่องกรุกระดาษ เครื่องหมุนแผ่นจานแม่เหล็ก เครื่องพิมพ์ ตลอดจนนำไปพัฒนากับหุ่นยนต์เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม เป็นต้น กล่าวโดยทั่ว ๆ ไป สเตปปิ้งมอเตอร์เป็นอุปกรณ์เครื่องกลไฟฟ้าที่สามารถเปลี่ยนดิจิตอลพัลส์ที่ป้อนเข้ามา เป็นการเคลื่อนที่แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) เพลาของมอเตอร์จะหมุนเป็นขั้น ๆ ขึ้นอยู่กับจำนวนพัลส์ที่ป้อนเข้ามา สเตปปิ้งมอเตอร์มีหลายแบบ แต่แบบที่นิยมใช้มากที่สุดคือแบบที่มีโรเตอร์เป็นแกนแม่เหล็กซึ่งความสามารถและการใช้งานของแต่ละชนิดจะได้กล่าวต่อไป

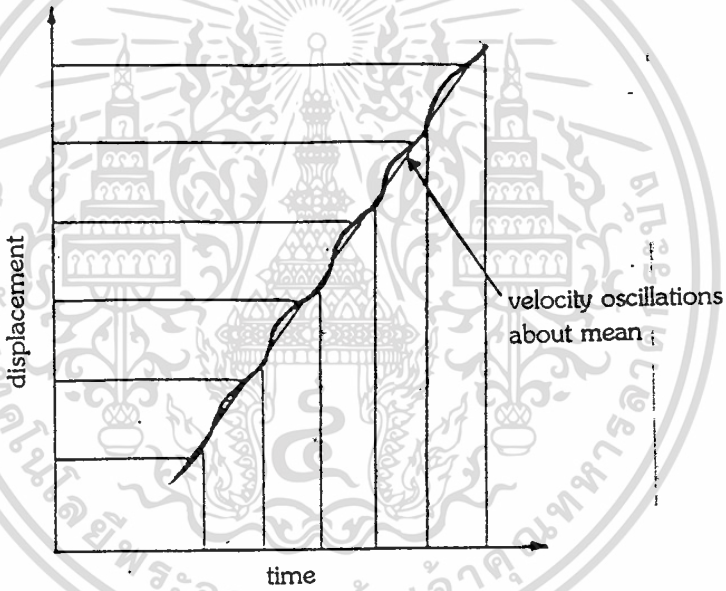


รูปที่ 1. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางขจัดกับเวลาในขณะที่เคลื่อนแบบไม่ต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานของสเตปปิ้งมอเตอร์มีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของพัลส์ที่ป้อนเข้ามาและเงื่อนไขของภาระ (load) ภายใต้การใช้งาน ถ้าสเตปปิ้งมอเตอร์ถูกกระตุ้นโดยพัลส์ที่มีอัตราเร็วต่ำจะมีการหยุดเมื่อการเคลื่อนที่ของแต่ละขั้นสิ้นสุดลง ดังแสดงในรูปที่ 1. ซึ่งใช้ในงานที่มีการเคลื่อนที่ในระยะสั้น ๆ

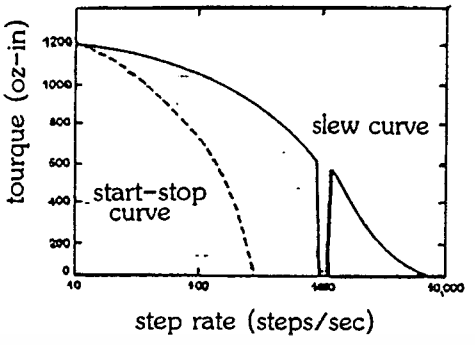
เมื่อมีการเพิ่มอัตราเร็วของพัลส์ที่ป้อนเข้ามา การเคลื่อนที่จากแบบไม่ต่อเนื่องเป็นการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับแบบต่อเนื่อง (continuous) หรือเรียกว่าแบบสลิววิ่ง (slewing) วิธีการเคลื่อนที่แบบนี้การหมุนจะไม่หยุดระหว่างขั้นเมื่อการเคลื่อนที่ในแต่ละขั้นสิ้นสุดลง ดูในรูปที่ 2. วิธีการนี้หากปราศจากการเลือกอัตราเร็วของพัลส์ที่ป้อนเข้ามาอย่างระมัดระวังอาจทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่คลาดสเตป (miss step) ได้ ในรูปจะเห็นว่าความเร็วของสเตปปิ้งมอเตอร์ในขณะเคลื่อนที่แบบสลิววิ่งมีอัตราเร็วเฉลี่ยคงที่และค่าอัตราเร็วเฉลี่ยได้มาจากความเร็วที่สั่นไปมา



รูปที่ 2. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางขจัดกับเวลาในการเคลื่อนที่แบบสลิววิ่ง

ในรูปที่ 3. เป็นเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและอัตราเร็วของสเตปปิ้งมอเตอร์ในแต่ละวิธีใช้งาน พื้นที่ใต้เส้นประใช้สำหรับการเคลื่อนที่แบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งถ้าภาระที่กำหนดให้ใช้ในระบบมีค่าต่ำเพียงพอจะทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่โดยปราศจากการคลาดสเตป อย่างไรก็ตามการใช้งานแบบสลิววิ่งจะทำให้มอเตอร์สร้างแรงบิดได้มากกว่า แต่การเปลี่ยนอัตราเร็วต้องทำอย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้แรงบิดที่ใช้งานสูงกว่าแรงบิดสูงสุด ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่คลาดสเตป ข้อได้เปรียบสิ่งหนึ่งของการใช้สเตปปิ้งมอเตอร์โดยการตรวจสอบลิมิตของแรงบิดกับอัตราเร็ว ถ้ามีแรงบิดต่ำเพียงพอจะสามารถใช้มอเตอร์ในการควบคุมแบบเปิด

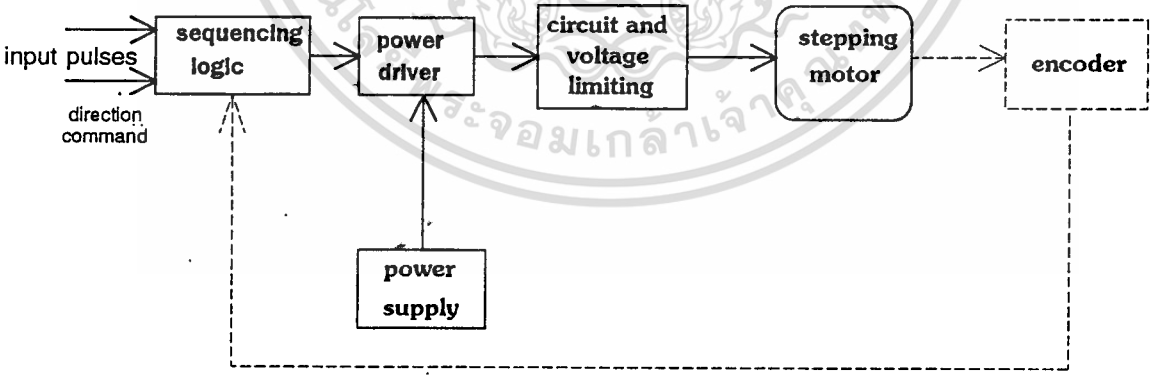
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับอัตราเร็ว

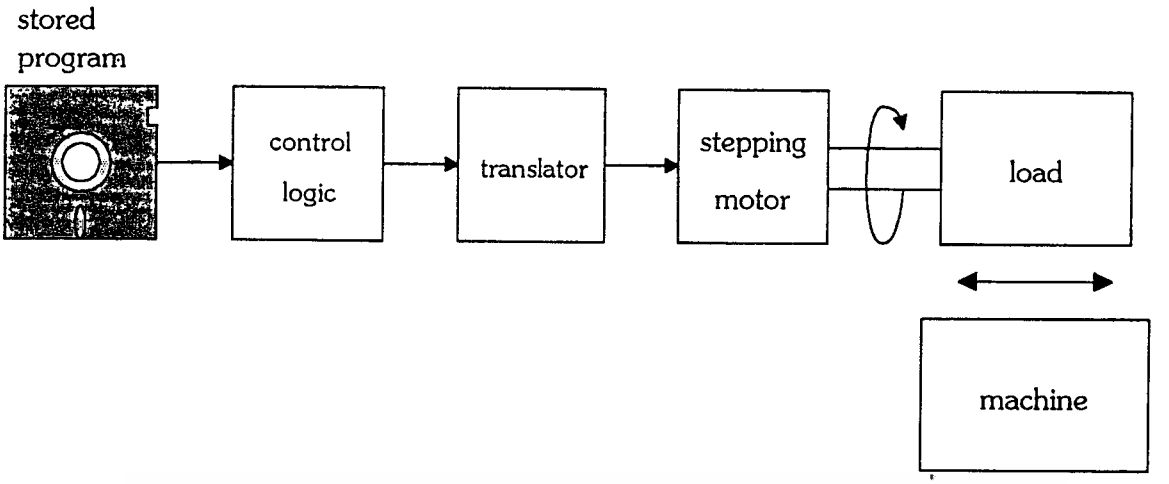
ระบบการควบคุมของสเตปปิ้งมอเตอร์

ไดอะแกรมในรูปที่ 4. แสดงอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการควบคุมการหมุนของสเตปปิ้งมอเตอร์ ประกอบด้วยลอจิกซีเควนเซอร์ เพาเวอร์ไดรเวอร์ เพาเวอร์ซัพพลาย อุปกรณ์ป้อนกลับความเร็วหรือตำแหน่งซึ่งจะใช้ในกรณีควบคุมแบบป้อนกลับ ลอจิกซีเควนเซอร์ได้รับพัลส์ที่ป้อนเข้ามาพร้อมกับสัญญาณที่แสดงทิศทางการหมุน และจ่ายสัญญาณที่มีแรงเคลื่อนต่ำแก่วงจรเพาเวอร์ไดรเวอร์ วงจรนี้จะเอาสัญญาณที่มีแรงเคลื่อนต่ำไปขยายกำลังเพื่อป้อนให้แก่สเตปปิ้งมอเตอร์อีกทีหนึ่ง



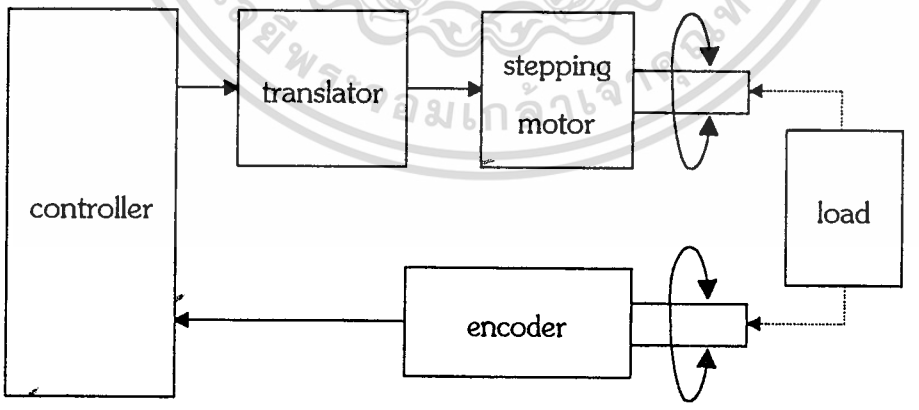
รูปที่ 4. ไดอะแกรมแสดงรายละเอียดอุปกรณ์ควบคุมการหมุนของสเตปปิ้งมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5. แสดงการประยุกต์ใช้สเตปปิ้งมอเตอร์ในเครื่องเอ็นซี
(numerically control machine)

สเตปปิ้งมอเตอร์มักถูกนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องเอ็นซี เนื่องมาจากค่าผิดพลาดจากการเคลื่อนที่จะไม่มีการสะสมและไม่จำเป็นต้องใช้ระบบป้อนกลับ ตัวอย่างการใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับของสเตปปิ้งมอเตอร์แสดงในรูปที่ 6. ถึงแม้ว่าสเตปปิ้งมอเตอร์ใช้กับการควบคุมแบบเปิด การควบคุมแบบป้อนกลับอาจจำเป็นสำหรับการประยุกต์ใช้ในบางกรณีที่ภาระไม่สามารถคาดคะเนได้ ซึ่งเป็นสิ่งทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่เกิดการคลาดสเตป หรือตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไม่ตรงกับเพลาของมอเตอร์อันเนื่องมาจากเกียร์แบคแลช (gear backlash)



รูปที่ 6. แสดงการใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

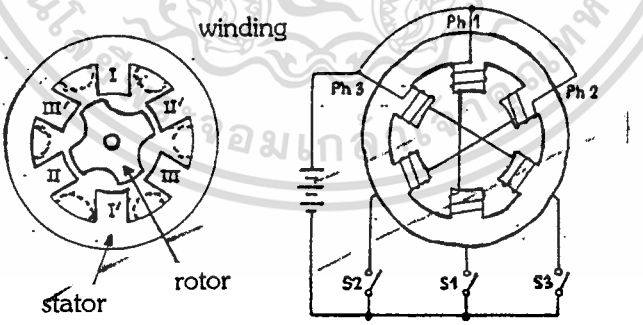
สเตปปิ้งมอเตอร์เป็นอุปกรณ์เครื่องกลไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งแปลงสัญญาณดิจิตอลพัลส์ไปเป็นการหมุน โดยลักษณะการหมุนหรือการเคลื่อนที่เป็นแบบทีละขั้น ตามแต่พัลส์ที่จะป้อนเข้ามา ทำให้ทราบตำแหน่งได้ถูกต้อง ปัจจุบันสเตปปิ้งมอเตอร์มักถูกนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ของระบบคอมพิวเตอร์อย่างแพร่หลาย เช่นเครื่องพิมพ์ หรือกลไกส่วนที่ใช้หมุนแผ่นจานแม่เหล็ก เป็นต้น

ชนิดของสเตปปิ้งมอเตอร์

สเตปปิ้งมอเตอร์ที่ใช้งานโดยทั่ว ๆ ไปสามารถแบ่งออกเป็นชนิดตามลักษณะของโครงสร้างและการทำงานดังนี้

1. วีอาร์มอเตอร์ (VR motor)

วาริเอเบิ้ลรีลัคแตนซ์ (Variable-reluctance) สเตปปิ้งมอเตอร์ หรือ วีอาร์มอเตอร์ อาจจัดได้ว่าเป็นชนิดพื้นฐานที่สุดของสเตปปิ้งมอเตอร์ รูปที่ 7. แสดงภาพหน้าตัดและรูปแบบการทำงานของมอเตอร์ซึ่งเป็นชนิด 3 เฟส จะเห็นได้ว่าที่สเตเตอร์มีฟัน 6 ฟันและฟันของสเตเตอร์ที่อยู่ตรงข้ามกันห่างกัน 180 องศา จะเป็นเฟสเดียวกันเรียกว่า คอยล์ (coil) ในแต่ละฟันของสเตเตอร์ที่อยู่ตรงข้ามกันจะต่อกันแบบอนุกรมหรือขนาน (ในรูปเป็นการต่อแบบอนุกรม) โรเตอร์จะมีจำนวน 4 ฟัน แกนของสเตเตอร์และโรเตอร์ปกติทำมาจากโลหะพวกที่มีค่า permeability สูง ซึ่งสามารถยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านตัวมันเองได้ดี



รูปที่ 7. แสดงภาพตัดขวางและการทำงานของวีอาร์สเตปปิ้งมอเตอร์

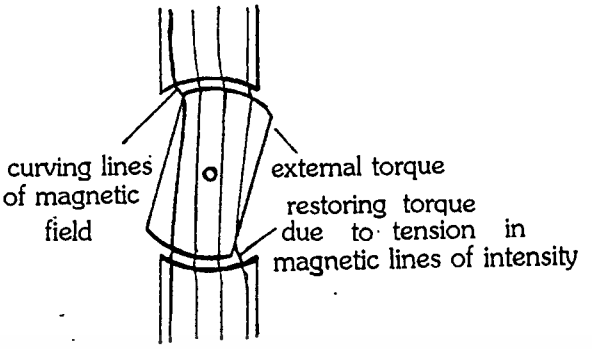
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะเห็นว่าฟันของสเตเตอร์ที่อยู่ในเฟสเดียวกัน ควรจะมีขั้วแม่เหล็กเหมือนกันหรือตรงกันข้ามกัน ในที่นี้เราให้ฟันทั้งสองมีขั้วตรงข้ามกัน จากรูปที่ 7. ฟันที่ I II III เป็นขั้วเหนือและฟันที่ I′ II′ III′ เป็นขั้วใต้เมื่อมีการกระตุ้นเกิดขึ้น

กระแสไฟที่จ่ายให้แต่ละเฟสจะถูกควบคุมโดยสวิท เปิด-ปิด s1 , s2 , s3 ตามลำดับ ถ้าจ่ายกระแสไฟให้กับคอยล์ของเฟสที่ 1 หรืออีกในหนึ่งคือ Ph1 ถูกกระตุ้น จะมีเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8. โรเตอร์จะเคลื่อนที่ทันทีจนกระทั่งฟันของสเตเตอร์ I , I′ และฟันของโรเตอร์อยู่ในแนวกัน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าแมกนีติครีลัคแตนซ์ (magneticreluctance) น้อยที่สุด โรเตอร์จะหยุดการเคลื่อนที่ เราเรียกตำแหน่งนี้ว่า ตำแหน่งสมดุลย์ (equilibium) แต่ถ้าโรเตอร์มีแนวโน้มเคลื่อนออกจากสมดุลย์ อันเนื่องมาจากแรงภายนอกกระทำต่อเพลาของมอเตอร์จะเกิดแรงบิดรีสตอริ่ง (restoring)ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9. ในรูปนี้จะเห็นว่า แรงภายนอกที่กระทำต่อเพลาในทิศทางตามเข็มเวลา (cw) และทำให้โรเตอร์เคลื่อนตัวเบี่ยงออกจากตำแหน่งสมดุลย์ในทิศทางเดียวกัน เป็นผลทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเกิดการหักเบี่ยงไป ซึ่งจากกฎของแมกซ์เวล (Mawwell) จะทำให้เกิดแรงบิดทวนเข็มเพื่อรักษาเส้นแรงแม่เหล็กให้อยู่ในแนวเส้นตรงและสั้นที่สุด จึงทำให้เกิดแรงบิดรีสตอริ่งขึ้น

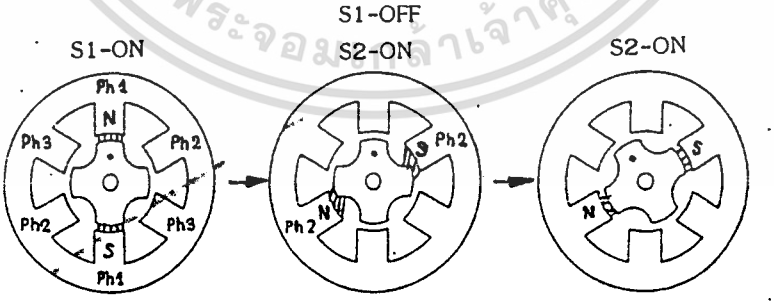
รูปที่ 8. แสดงตำแหน่งสมดุลย์เมื่อเฟสที่ 1 ถูกกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9. แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิด

ในรูปเดียวกันเมื่อตำแหน่งฟันของสเตเตอร์และโรเตอร์ ไม่อยู่ในแนวเดียวกันในเฟสที่ถูกกระตุ้น จะทำให้เกิดค่าของแมกนีติกรีลัคแตนซ์ (magnetic reluctance) มาก วีอาร์มอเตอร์มีการทำงานในลักษณะที่จะลดค่าแมกนีติกรีลัคแตนซ์ให้มีค่าน้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น เมื่อบิด Ph1 และ Ph2 ค่ารีลัคแตนซ์ของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นทันทีหลังจากสวิทช์เพิ่งจะเปลี่ยนไปดูในรูปที่ 10. โรเตอร์จะเคลื่อนที่ไป 1 สเตปแองเกิล (ในที่นี้ 30 องศา) ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เพื่อที่จะลดค่ารีลัคแตนซ์ การเคลื่อนที่ไป 1 สเตปแองเกิล ในแต่ละสวิทชิงของการกระตุ้น เรียก 1 สเตป

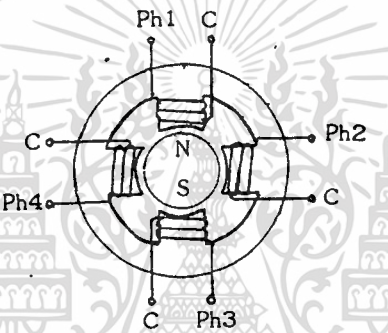


รูปที่ 10. แสดงการเคลื่อนที่ 1 สเตปเมื่อเปลี่ยนการกระตุ้นจาก Ph1 เป็น Ph2

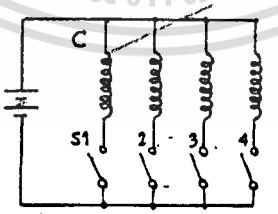
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พีเอ็มสเตปปิ้งมอเตอร์ (PM stepping motor)

สเตปปิ้งมอเตอร์ที่ใช้แม่เหล็กถาวร (permanent magnet) เป็นโรเตอร์เรียกว่าพีเอ็ม (PM) มอเตอร์ ตัวอย่างของพีเอ็มสเตปปิ้งชนิด 4 เฟส แบบพื้นฐานแสดงในรูปที่ 11. แกนที่เป็นรูปทรงกระบอกคือ โรเตอร์ และฟันของสเตเตอร์มีทั้งหมด 4 ฟัน ถูกพันด้วยขดลวด วงจรพื้นฐานสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิดนี้แสดงให้เห็นในรูปที่ 12 เครื่องหมาย c ในแต่ละขั้วถูกต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ (power supply) ถ้าเฟสของมอเตอร์ถูกกระตุ้นโดยมีลำดับ Ph1 Ph2 Ph3 โรเตอร์จะถูกขับเคลื่อนในทิศทางตามเข็ม (cw) ดังแสดงในรูปที่ 13. ในที่นี้จะได้มุมของสเตปเป็น 90 องศา แต่ถ้าจำนวนฟันของสเตเตอร์และแมกนีติคโพล (magnetic poles) บนโรเตอร์เพิ่มเป็นสองเท่า จะมีสเตปแองเกิลเป็น 45 องศา

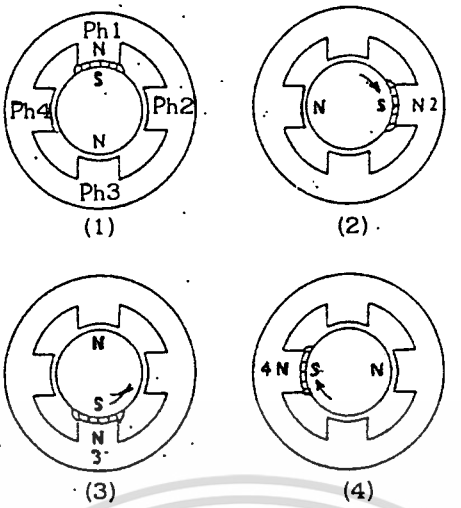


รูปที่ 11. แสดงภาพหน้าตัดของพีเอ็มมอเตอร์ชนิด 4 เฟส



รูปที่ 12. แสดงวงจรพื้นฐานสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ 4 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



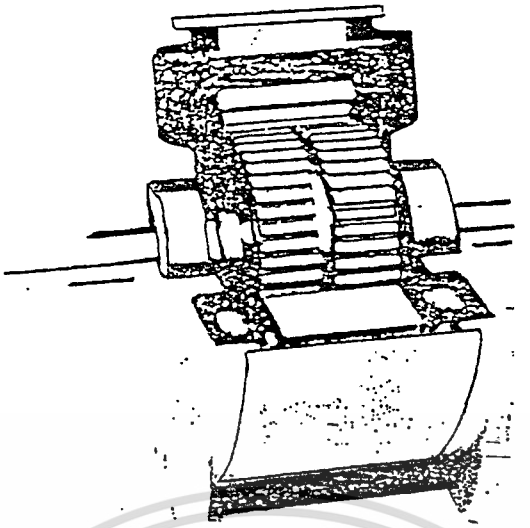
รูปที่ 13. แสดงการเคลื่อนที่ของพีเอ็มมอเตอร์ชนิด 4 เฟส

เพื่อที่จะลดค่าสเต็ปแองเกิลในพีเอ็มมอเตอร์ จำนวนของแมกนีติคโพลและจำนวนฟันของสเตเตอร์จะต้องเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจะมีลิมิตสำหรับจำนวนฟันของสเตเตอร์และโพลของแม่เหล็ก ทางเลือกอีกทางหนึ่งคือใช้โครงสร้างแบบไฮบริด (hybrid) เพื่อต้องการให้สเตปแองเกิลมีค่าน้อย ลักษณะสำคัญของพีเอ็มมอเตอร์คือ โรเตอร์จะหยุดอยู่ที่ตำแหน่งผ่อนคลาย (detent position) ถ้าหากปราศจากการกระตุ้น มีข้อเสียสำหรับการใช้พีเอ็มมอเตอร์คือ แม่เหล็กมีราคาแพงและระดับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กถูกกำจัดโดยแมกนีติครีมาแนนซ์ (magnetic remanance) ของแม่เหล็ก แม่เหล็กชนิดเฟอไร (ferrie magnet) มีราคาถูกแต่ไม่สามารถผลิตแรงบิดได้สูงเพราะมีค่ารีมาแนนซ์ต่ำ

3. ไฮบริดสเตปปิ้งมอเตอร์ (hybrid stepping motor)

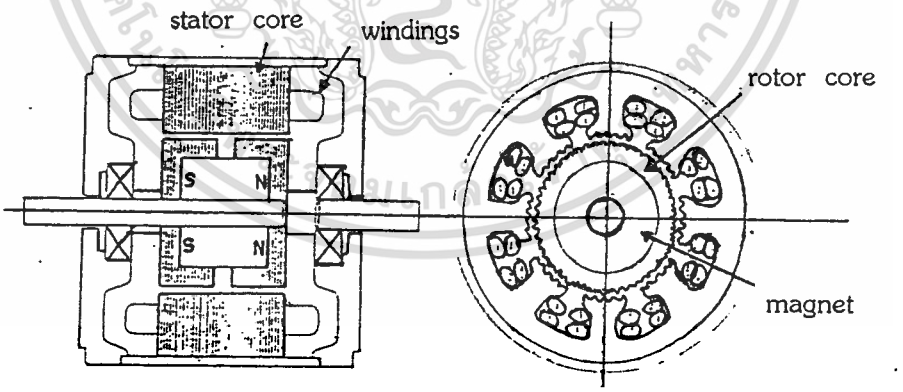
อีกชนิดหนึ่งของสเตปปิ้งมอเตอร์ที่มีโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร (permanent magnet) คือไฮบริดสเตปปิ้งมอเตอร์ คำว่า ไฮบริด (hybrid) ได้มาจากการนำเอาวิธีการทำงานของพีเอ็มและวีอาร์สเตปปิ้งมอเตอร์มารวมกัน ดูภาพตัดและไดอะแกรม จากรูปที่ 14. และ 15. โดยเฉพาะโครงสร้างของสเตเตอร์ คอร์ (cor) มีลักษณะเหมือนกับวีอาร์มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 14. แสดงภาพตัดของไฮบริดมอเตอร์

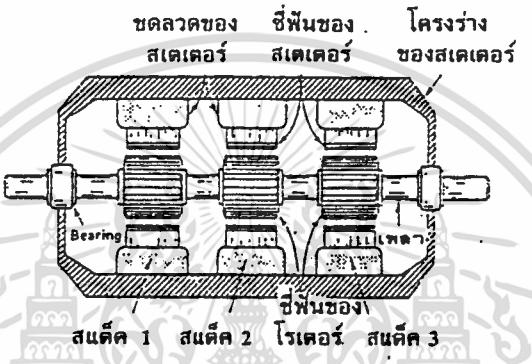
แต่การต่อขดลวดแตกต่างจากวีอาร์มอเตอร์ มีเพียงคอยล์ (coil) จาก 2 คอยล์ในเฟสที่พันอยู่ในโพล ในขณะที่ไฮบริดสเตปปิ้งมอเตอร์ชนิด 4 เฟส มี 2 คอยล์ซึ่งมีเฟสต่างกันพันอยู่ในโพลเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 15 ดังนั้นโพลจะไม่ใช่ของเฟสเพียงเฟสเดียว การที่มี 2 คอยล์พันอยู่ใน โพลเดียวกันเรียก bifilar scheme



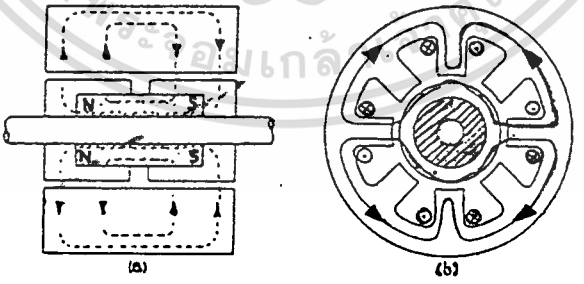
รูปที่ 15. แสดงโครงสร้างของไฮบริดมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สำคัญอีกอย่างของไฮบริดมอเตอร์คือ โครงสร้างของโรเตอร์ที่มีแม่เหล็กฝังอยู่ในแกนของโรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 16 และจะสร้างสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 17 โดยเฉพาะโครงสร้างของสเตเตอร์ คอร์มีลักษณะเหมือนกับของวีอาร์มอเตอร์ แต่ละโพลของแม่เหล็กจะปกคลุมด้วยฟันที่เรียงกันอยู่อย่างสม่ำเสมอ ฟันของโรเตอร์แบ่งออกเป็นสองส่วนซึ่งมีแนวไม่ตรงกัน โดยอยู่เยื้องกัน 1/2 ของพิทช์ ในไฮบริดมอเตอร์บางชนิด ฟันของโรเตอร์จะมีแนวตรงกัน แต่ฟันของสเตเตอร์จะเยื้องกัน



รูปที่ 16. แสดงภาพตัดของโรเตอร์ของไฮบริดมอเตอร์



รูปที่ 17. แสดงทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กของไฮบริดมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการกระตุ้น (mode of exitation)

ในการอธิบายที่ผ่านมาเพียงอธิบายรูปแบบของการกระตุ้นแบบทีละเฟส ซึ่งเป็นวิธีการแบบพื้นฐานที่สุดของการขับเคลื่อนสเตปปิ้งมอเตอร์ และมักจะใช้วิธีการกระตุ้นแบบนี้ในการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ต่อไปจะกล่าวถึงวีธีการกระตุ้นแบบต่าง ๆ

1. การกระตุ้นแบบทีละเฟส (Single-phase exitation)

ตารางที่ 1 แสดงลำดับของการกระตุ้นแบบทีละเฟส สำหรับมอเตอร์ชนิด 3 เฟสหรือ 4 เฟส ส่วนที่แรเงาในตารางแสดงถึงสภาวะของขดลวด (winding) ที่ถูกกระตุ้น เมื่อมอเตอร์หมุนตามเข็มในลำดับของการกระตุ้น Ph1, Ph2, Ph3, Ph1 และจะหมุนทวนเข็มในลำดับ Ph1, Ph3, Ph2, Ph1

(1) three-phase motor

	R	1	2	3	4	5	6	7	8
phase1	▨			▨			▨		
phase2		▨			▨			▨	
phase3			▨			▨			▨

(2) four-phase motor

	R	1	2	3	4	5	6	7	8
phase1	▨				▨				▨
phase2		▨				▨			
phase3			▨				▨		
phase4				▨				▨	
pulse									

note: symbol R indicates "reset"

ตารางที่ 1. แสดงลำดับการกระตุ้นแบบทีละเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. **การกระตุ้นแบบทีละสองเฟส** (two-phase exitation)

การที่มอเตอร์หมุนเนื่องจากการกระตุ้นในแบบทีละสองเฟส มักจะเรียกการขับเคลื่อนแบบนี้ว่า Two-phase-on พิจารณาในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงลำดับของการกระตุ้นและดูความสัมพันธ์ของฟัน (teeth) โรเตอร์และสเตเตอร์ในตำแหน่งที่สภาวะสมดุลย์ในรูปที่ 18. ซึ่งจะเห็นว่าตำแหน่งของฟันจะไม่อยู่ในแนวเดียวกันเหมือนการกระตุ้นแบบทละเฟส

(1) three-phase motor

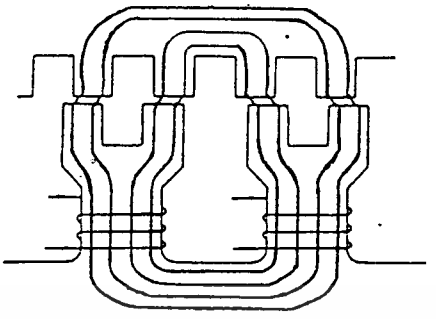
clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
phase1									
phase2									
phase3									

(2) four-phase motor

clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
phase1									
phase2									
phase3									
phase4									

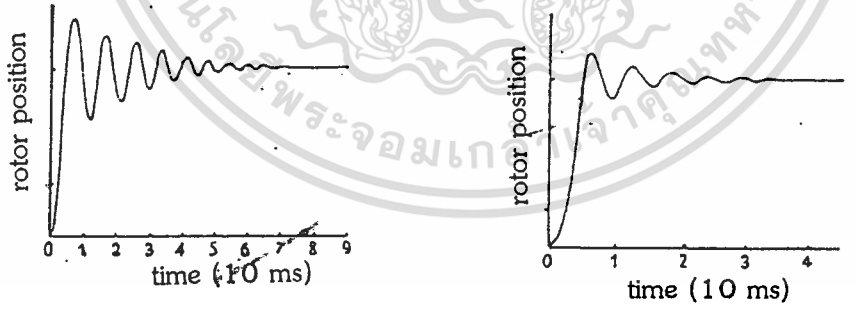
ตารางที่ 2. แสดงลำดับของการกระตุ้นแบบทีละ 2 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 18. แสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งในการกระตุ้นแบบ 2 เฟส

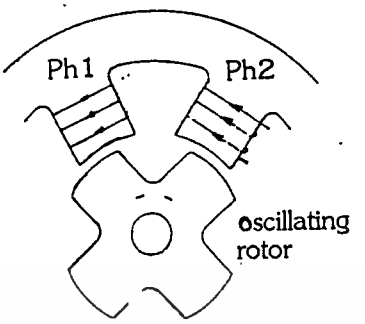
ลักษณะที่แตกต่างกันระหว่างการขับเคลื่อนแบบทีละเฟสและทีละสองเฟส แสดงให้เห็นจาก transient response ดังในรูปที่ 18. จะเห็นได้ว่าในการขับเคลื่อนแบบทีละสองเฟส การสั่นจะเกิดขึ้นในช่วงที่สั้นกว่าการขับเคลื่อนแบบทีละเฟส ซึ่งสามารถอธิบายได้ในรูปที่ 19. และรูปที่ 20.



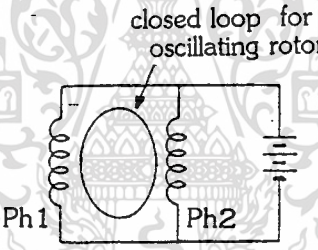
(a) แบบทีละเฟส (b) แบบทีละสองเฟส

รูปที่ 19. แสดงความแตกต่างของการตอบสนองใน single step

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 20. การสั่นของโรเตอร์ในการกระตุ้นแบบทีละสองเฟส



รูปที่ 21. แสดงวงจรไฟฟ้าของการกระตุ้นแบบสองเฟส

การทำงานแบบการกระตุ้นทีละสองเฟสนี้ วงจรไฟฟ้าของสองเฟสเป็นแบบปิดลูพและเมื่อมีการสั่นเกิดขึ้นในสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรที่เพิ่มขึ้นส่วนหนึ่งจากสภาวะสมดุลย์ที่ทำให้เกิด holding torque โดยสนามแม่เหล็กมีทิศตรงข้ามกัน ทำให้เกิดแรงบิดต้านการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการสั่น ดังนั้นการกระตุ้นในแบบทีละสองเฟสทำให้ลดการสั่นของสเตปปิ้งมอเตอร์ได้

3. **วิธีการกระตุ้นแบบครึ่งสเตป** (Half-step mode)

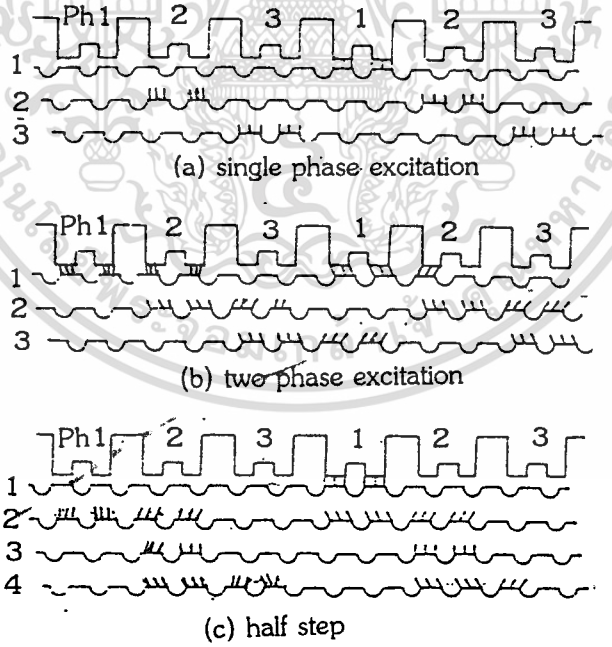
รูปแบบของการกระตุ้นแบบนี้ได้จากการรวมเอาวิธีการกระตุ้นทีละเฟสและสองเฟสมาใช้ เรียกวิธีนี้ว่า half-step ในตารางที่ 3 แสดงลำดับของการกระตุ้นแบบนี้กับมอเตอร์ 3 เฟส ในที่นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

clock state ถูกนำเข้า 2 ทาง คือ (a) และ (b) ในทาง (a) การเคลื่อนตำแหน่งกระทำโดยการกระตุ้นแบบทีละเฟสเท่านั้น จะกระตุ้นแบบทีละสองเฟสในขณะที่หมุนจากตำแหน่งสมดุลย์ไปหยุดที่อีกตำแหน่งหนึ่ง การกระตุ้นแบบ half step ทำให้ได้สเตปแองเกิล (step angle) เป็นครึ่งหนึ่งและสามารถลดการสั่นของการใช้งานได้ด้วย ในกรณีที่มอเตอร์มีมากกว่า 4 เฟส การขับแบบครึ่งสเตปจะเกิดการรวมวิธีการกระตุ้นแบบ 2 เฟสและ 3 เฟส

clock state (A)	R	1		2		3		4		5	
clock state (B)	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
phase1	▨	▨				▨	▨	▨			
phase2		▨	▨	▨				▨	▨	▨	
phase3				▨	▨	▨				▨	▨

ตารางที่ 3. แสดงลำดับของการกระตุ้นในแบบครึ่งสเตป

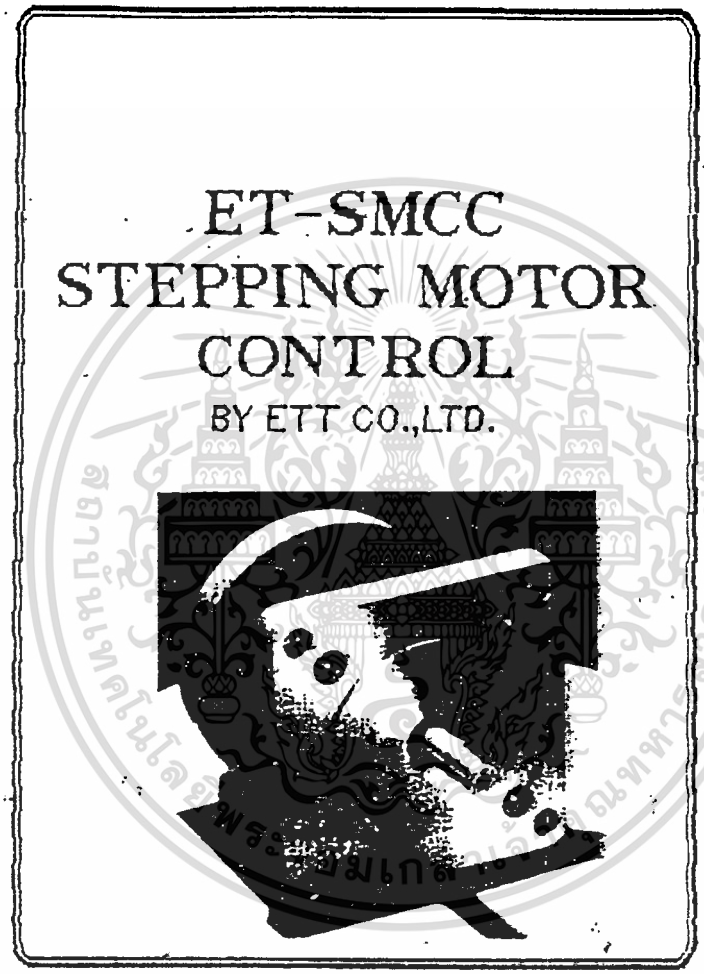


รูปที่ 22. แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการกระตุ้นทั้งสามแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือวงจรควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์

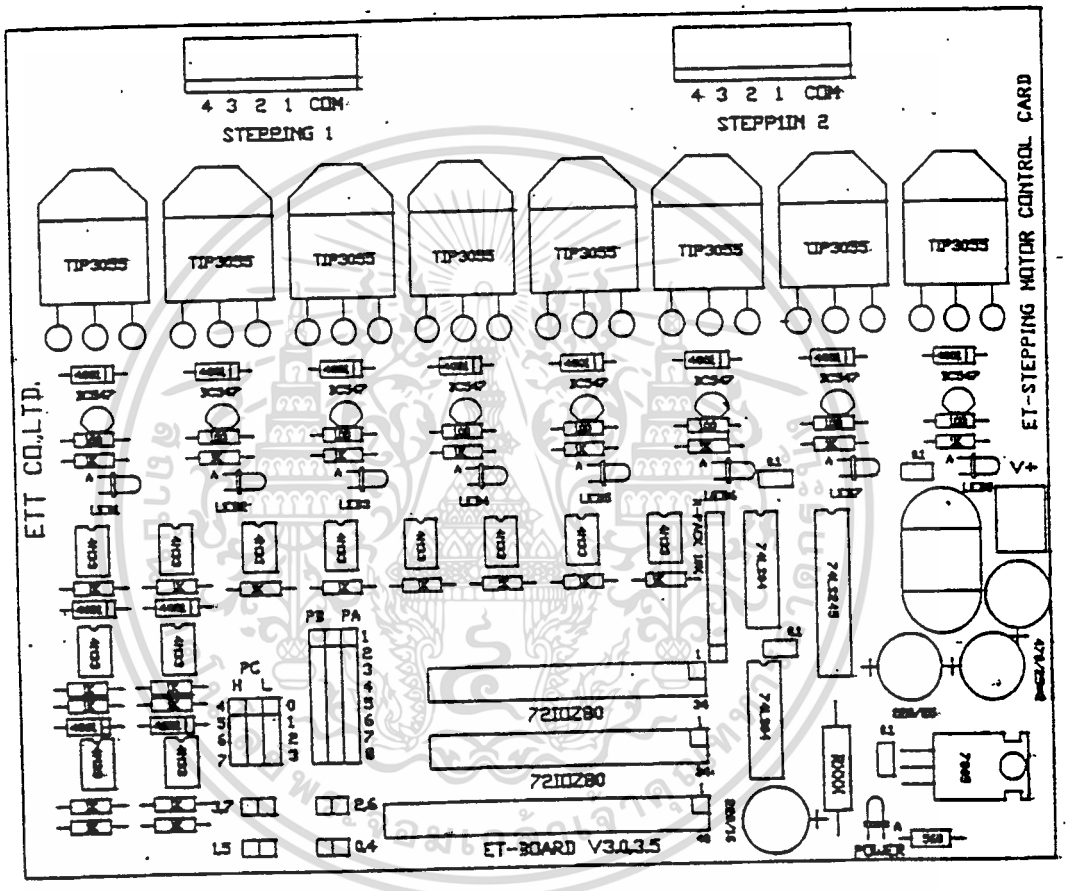
EC-SMCC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ET-SMCC (STEPPING MOTOR CONTROL CARD)

ลักษณะของ ET-SMCC

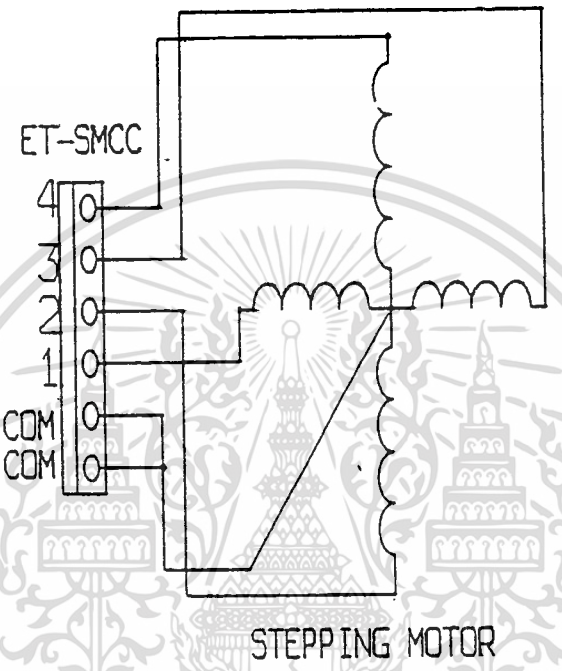


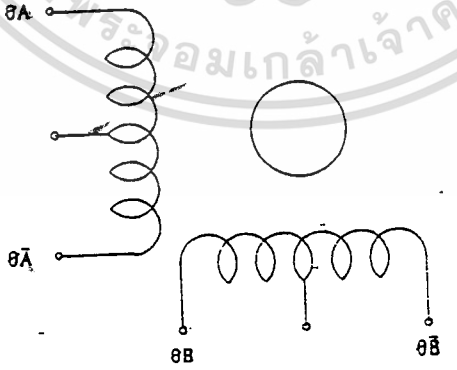
ET-SMCC จะเป็น CARD ต่อเข้ากับ PORT ของ 8255 หรือ PORT อื่นๆก็ได้โดยจะใช้ในการต่อควบคุมการทำงานของ STEPPING MOTOR โดยสามารถจะต่อกับ STEPPING MOTOR ได้ 2 ตัว ต่อหนึ่ง CARD หรือจะต่อร่วงอีกหนึ่ง CARD เพื่อใช้กับ STEPPING MOTOR 4 ตัวต่อ PORT 8225 จำนวน 1 ตัวล้วยก็ได้ นอกจากนี้ ET-SMCC จะมี INPUT ในรูปลักษณะ OPTO อีก 4 INPUT สามารถต่อกับ SW. ต่างๆได้อีกด้วย เช่น ต่อกับ MICRO SW. ตรวจการหมุนของ STEPPING MOTOR ว่าถึงจุดที่ต้องการแล้วหรือยัง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้งต่อกับอุปกรณ์ต่างๆของ EIT

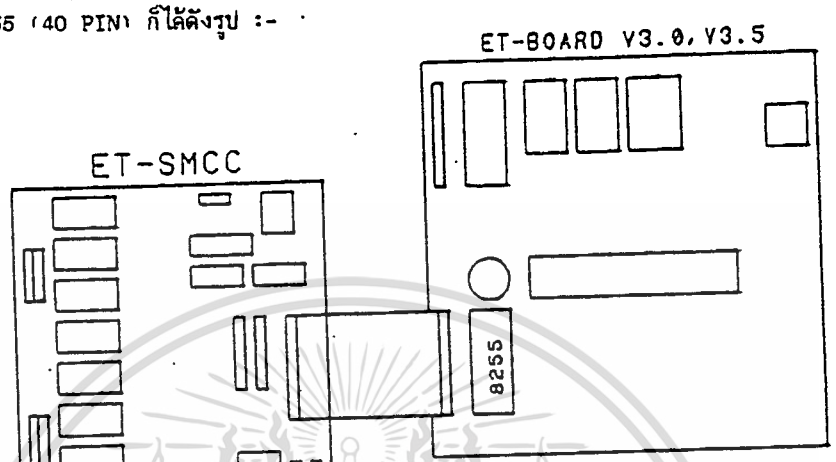
1. เราสามารถต่อกับ STEPPING MOTOR ตามรูปแบบขดของ STEPPING นั้นได้ดังรูป โดยต่อ MOTOR ได้ 2 ชุด



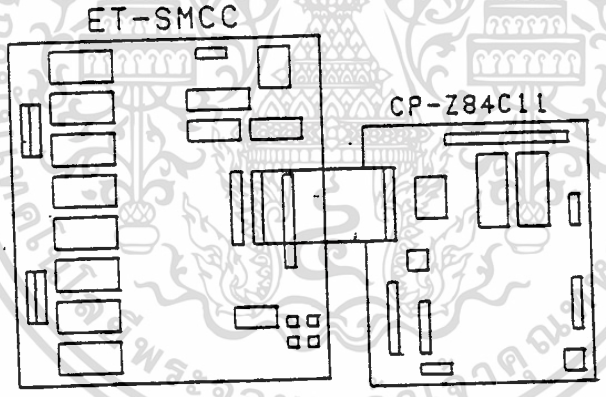


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

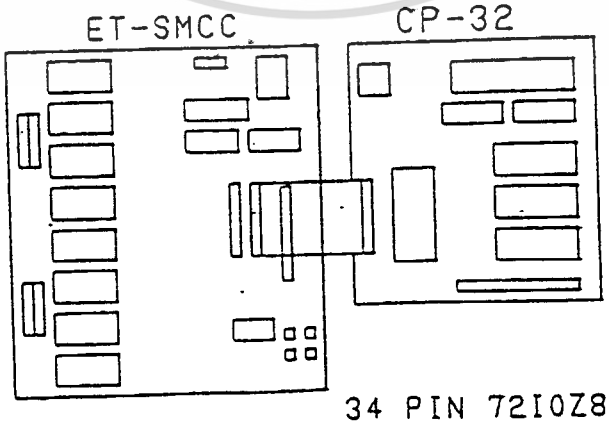
2. ต่อรวมกับ CARD ต่างๆของทางบริษัท อีทีที ทาง CONNECTOR 7210Z80 (34 PIN) หรือต่อกับ 8255 (40 PIN) ก็ได้ดังรูป :-



40 PIN 8255



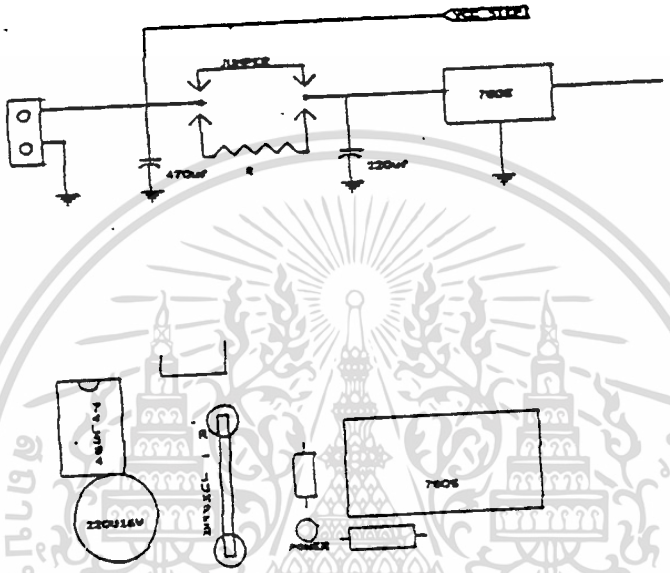
34 PIN 7210Z80



34 PIN 7210Z80

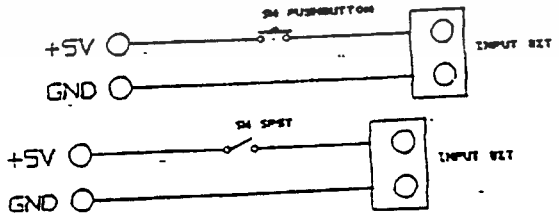
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ต่อ POWER SUPPLY กับ ET-SMCC และ STEPPING MOTOR จาก CARD ET-SMCC นั้นจะมีส่วนจ่าย POWER ให้กับอุปกรณ์บนบอร์ดจาก POWER ชุดเดียวกันกับที่จ่ายให้ STEPPING MOTOR โดยจะใช้ 7805 ปรับไฟจาก +12V หรือ +24V ตามระดับไฟที่ป้อนให้ STEPPING MOTOR โดยอาจจะต้องใช้ R ต่อแทนสาย JUMP ถ้าในกรณีต่อกับ STEPPING MOTOR ที่ต้องกับไฟมากกว่า 12V โดยควรต่อ R แทน JUMP (ในกรณีใช้ 24V ให้ต่อ R 50 OHM 5 W)



โดยวงจรภายใน ET-SMCC (ไม่รวม STEPPING MOTOR) ใช้กระแสไฟสูงสุด 250 mA

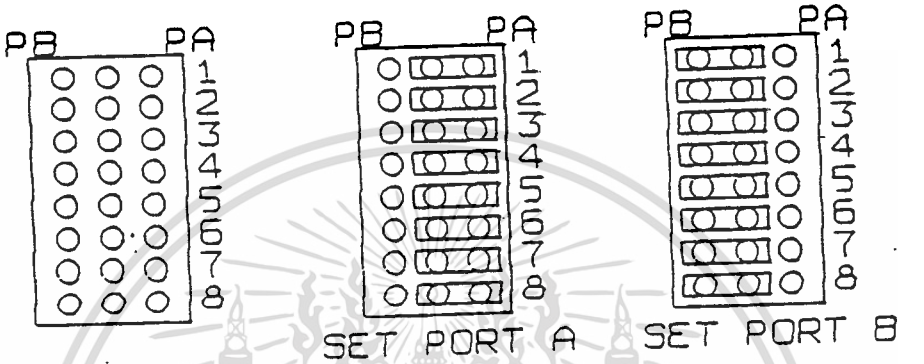
4. ถ้ามี INPUT จะต้องร่วมกับบอร์ด ET-SMCC ก็ได้ ต่อ INPUT PORT โดยเป็นลักษณะ OPTO ดังรูป โดยใช้ POWER +5V และถ้าต้องการใช้เป็น INPUT 24V ก็ให้เปลี่ยน R 1K ในส่วนของ INPUT เป็น R ค่า 3.3K ได้ดังรูป :-



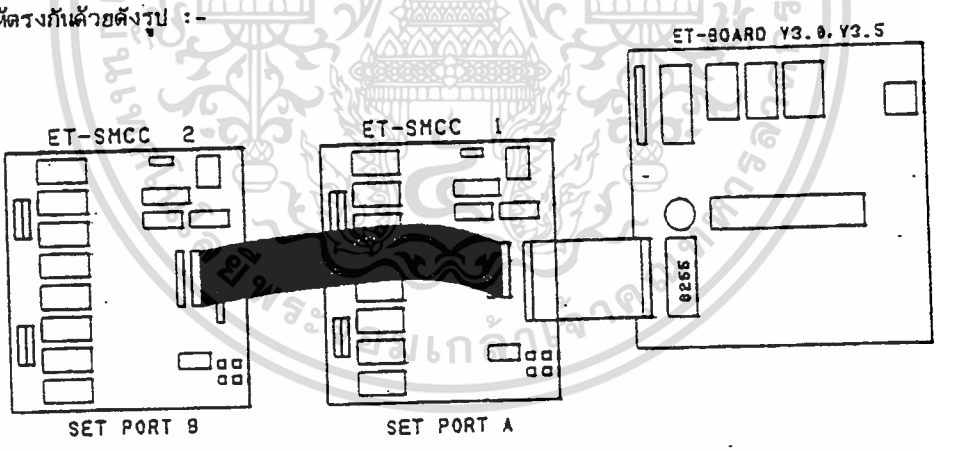
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ DECODE PORT

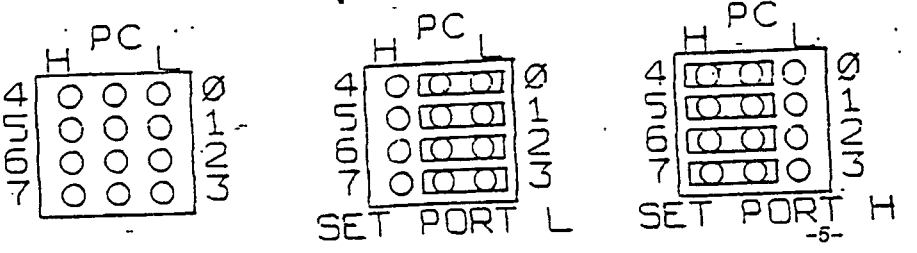
CARD ET-SMCC จะมี JUMPER อยู่ 2 ชุด โดยชุดแรกจะเป็นการเลือกว่า STEPPING MOTOR เราจะใช้ PORT ใดในการควบคุมคือจะใช้ PORT A หรือ PORT B ก็ได้ดังรูป :-



จากลักษณะนี้เราสามารถเลือก PORT A หรือ B ได้ทำให้ ET-SMCC สามารถต่อพ่วง ET-SMCC อีกชุดหนึ่งได้จากขั้ว 34 PIN (72IOZ80) ได้อีกด้วยโดยต้อง SET การใช้ PORT ในแต่ละ CARD ไม่ให้ตรงกันด้วยดังรูป :-



ชุดที่สองจะเป็นส่วนของ INPUT PORT โดยเราสามารถเลือกว่าจะรับ INPUT จาก PORT C ด้วย 4 BIT HI หรือ 4 BIT LO ดังรูป :-



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทำงานในการควบคุม STEPPING MOTOR

เราสามารถสั่งงานให้ STEPPING MOTOR หมุนได้แบบง่ายๆ 3 แบบ ตามกระแสไฟที่เราป้อนแก่เฟสต่างๆดังนี้ (รายละเอียดของ STEPPING ให้อ่านต่อได้จากคู่มือ ET-HARDWARE LAB)

1. แบบจ่ายกระแสไฟให้เฟสเดียวสลับกันไป หรือ ONE EXCITATION หรือแบบ HALF DRIVE คือ OUTPUT จะได้เป็น 0001 , 0010 , 0100 , 1000

HALF DRIVE

	OUT4	OUT3	OUT2	OUT1
1	Ø	Ø	Ø	1
2	Ø	Ø	1	Ø
3	Ø	1	Ø	Ø
4	1	Ø	Ø	Ø

การ OUT EXCITATION แบบนี้แรงบิดจะน้อย

2. แบบจ่ายกระแสไฟให้พร้อมกันทีเดียว 2 เฟส หรือ TWO-EXCITATION หรือ FULL STEP คือ 00011 , 0110 , 1100 , 1001 หมุนเวียนกันไปแบบนี้แรงบิดจะมาก

FULL STEP

	OUT4	OUT3	OUT2	OUT1
1	Ø	Ø	1	1
2	Ø	1	1	Ø
3	1	1	Ø	Ø
4	1	Ø	Ø	1

3. แบบจ่ายกระแสไฟให้ทีละ 1 เฟส สลับกับ 2 เฟส เรียก ONE-TWO EXCITATION แต่แบบนี้จำนวน STEP จะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของสองแบบแรกแต่แรงบิดเฉลี่ยจะน้อย การหมุนจะเป็น 0001 , 0011 , 0010 , 0110 , 0100 , 1100 , 1000 , 1001

ONE-TWO EXCITATION

	OUT4	OUT3	OUT2	OUT1
1	Ø	Ø	Ø	1
2	Ø	Ø	1	1
3	Ø	Ø	1	Ø
4	Ø	1	1	Ø
5	Ø	1	Ø	Ø
6	1	1	Ø	Ø
7	1	Ø	Ø	Ø
8	1	Ø	Ø	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

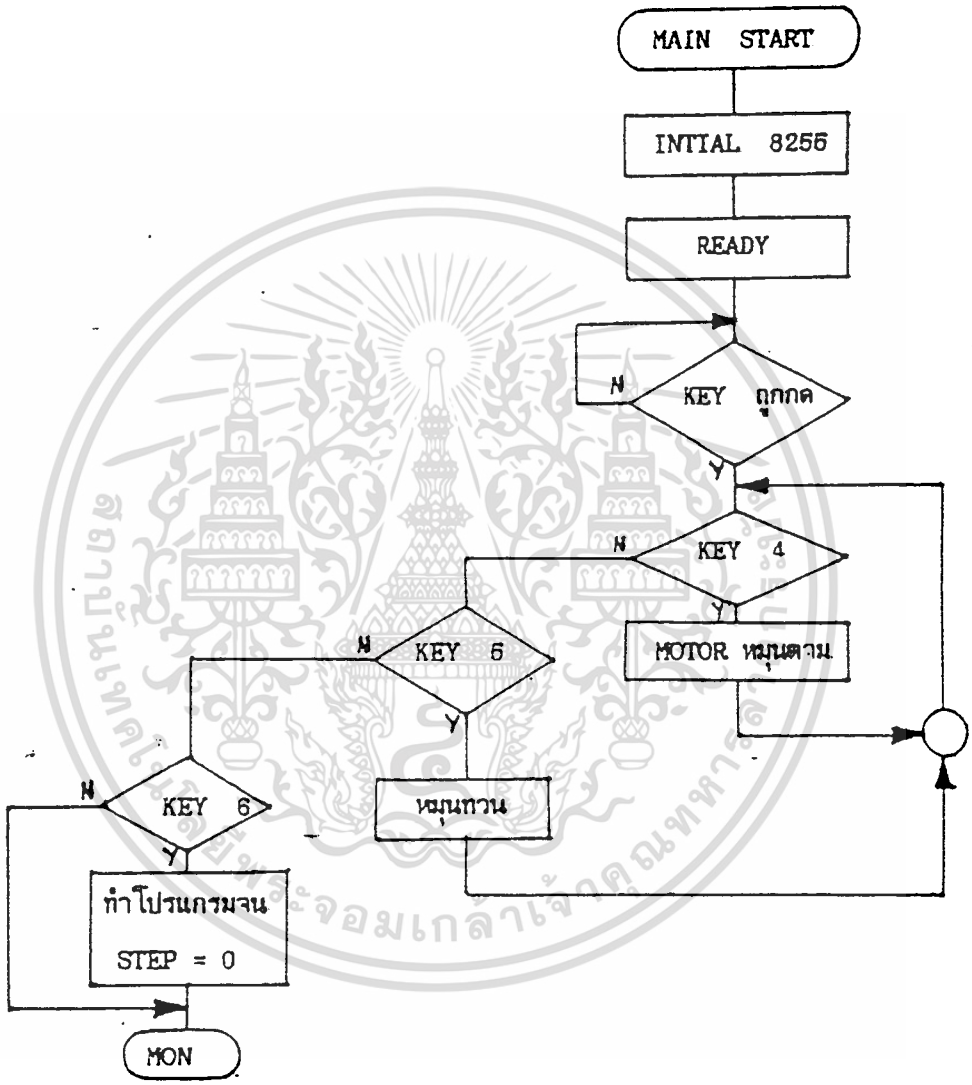
ตัวอย่างการใช้ต่อกับบอร์ดต่างๆของอีทีที

1. ตัวอย่างขับ STEPPING MOTOR แบบ HALF DRIVE โดยใช้บอร์ด ET-BOARD V3.0 หรือ V3.5 โดยต่อกับ PORT 8255 (ใช้ PORT A)

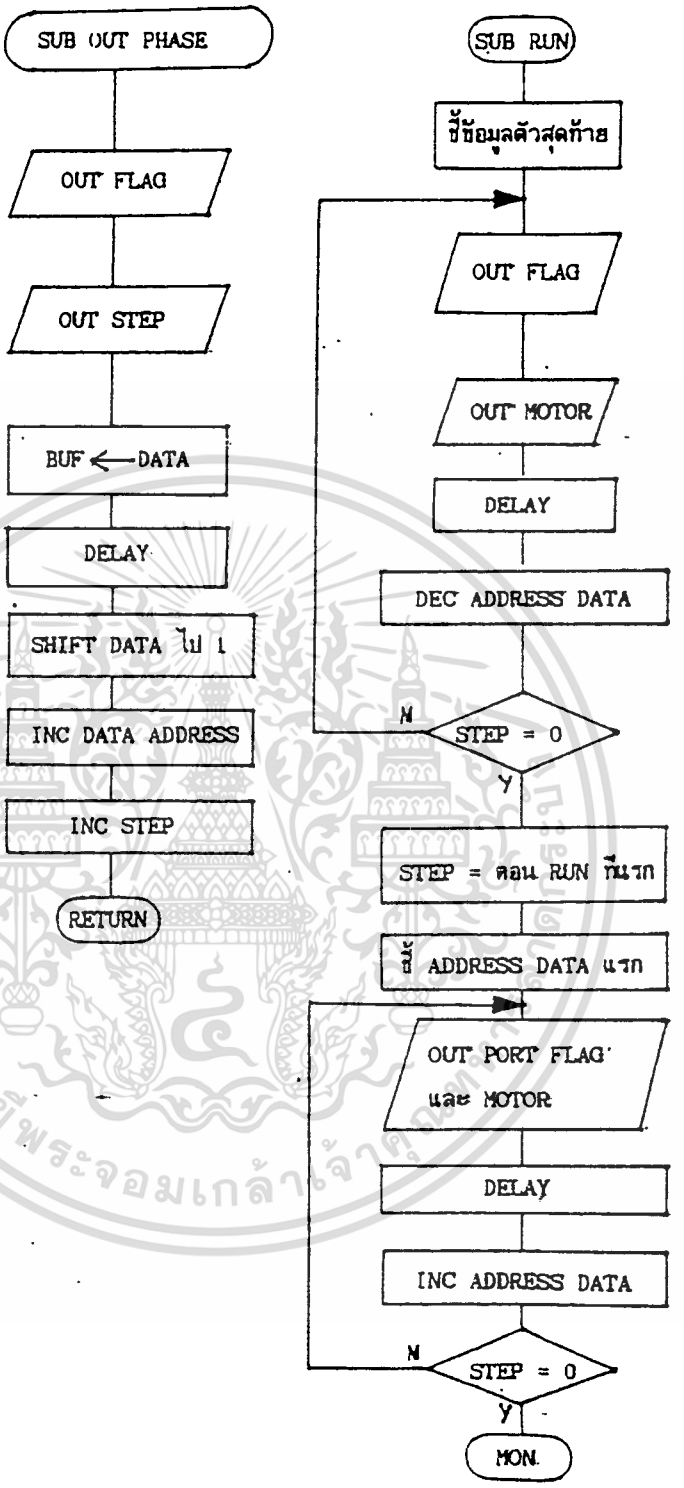
```
                ; TEST STEPPING MOTOR
                ; FOR ET-BOARD V3.0,3.5
                ;     ET-SMCC
                ; PROGRAM  ASM "C16"
                ;
                      CPU "Z80.TBL"
0000                  HOF "INT8"
0000
                ;     ORG  2000H
2000            ;
                PA:   EQU  20H
0020 =          PCC:  EQU  23H
0023 =          ;
                START: LD   A,80H          ;CONTROL PORT OUT
2000 3E80             OUT  (PCC),A
2002 D323             LD   A,00010001B     ;OUT STEP
2004 3E11       LOOP: OUT  (PA),A
2006 D320             RLCA
2008 07               CALL DELAY
2009 CD0E20           JR   LOOP
200C 18F8
                DELAY: PUSH AF
200E F5                LD   HL,2000H
200F 210020     DEL1:  DEC  HL
2012 2B                LD   A,H
2013 7C                OR   L
2014 B5                JR   NZ,DEL1
2015 20FB              POP  AF
2017 F1                RET
2018 C9                END
0000
```

2. ตัวอย่างขับ STEPPING MOTOR แบบ HALF DRIVE โดยสามารถโปรแกรมได้ต่อใช้กับบอร์ด ET-BOARD V3.0 หรือ V3.5 กับ PORT 8255 (ใช้ PORT A) การใช้งานจะมี KEY 3 KEY ใช้งานเดือ KEY 4 , 5 , 6 โดยถ้ากด KEY 4 จะเป็น KEY ให้ STEPPING MOTOR หมุนตามเข็ม ถ้ากด KEY 5 STEPPING MOTOR จะหมุนทวนเข็ม และ KEY 6 จะเป็นคือสั่งให้ RUN หมุน STEPPING MOTOR ตามโปรแกรมที่เรากด KEY 4 และ KEY 5 ถ้าเราใช้ STEPPING MOTOR 2 ตัว ต่อในลักษณะแกน X และ Y เราก็สามารถจดจำจุดตำแหน่งต่างๆได้อย่างแม่นยำนำไปต่อประยุกต์ใช้เป็นแขนกล หรือ PLOTER ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
1                       ;*****************************
2                       ;     TEST STEPPING MOTOR     *
3                       ;        STEP MEMMORY         *
4                       ;        ET-BOARD V3.0,V3.5   *
5                       ;        ET-SMCC              *
6                       ;     PROGRAM ASM "ZWC"       *
7                       ;*****************************
8                       ;
9         2000                  ORG   2000H
10                      ;
11        0000          MON     EQU   0
12        000D          READY   EQU   0DH
13        0010          SYSCAL  EQU   10H
14        2FFE          STMBUF  EQU   2FFEH
15        3000          STMDAT  EQU   3000H
16        3FFD          SYSFAG  EQU   3FFDH
17        3FE7          DISPY   EQU   3FE7H
18        0002          SCAN    EQU   2
19        0002          DIGIT   EQU   2
20        0001          SEGM    EQU   1
21        0003          CLEAR   EQU   3
22        0020          STMOP   EQU   20H
23        0023          STMINT  EQU   23H
24                      ;
25  2000  3E 80          STMST   LD    A,80H           ;INT
26  2002  D3 23                   OUT   (STMINT),A
27  2004  DD 21 3000              LD    IX,STMDAT       ;ADDRESS DATA
28  2008  DD 22 2FFE              LD    (STMBUF),IX
29                      ;
30  200C  3E 03                   LD    A,CLEAR         ;CLEAR DISPLAY
31  200E  D7                      RST   SYSCAL
32  200F  16 01                   LD    D,1             ;DATA
33  2011  01 0000                 LD    BC,0            ;NUMBER STEP
34  2014  D5              STM     PUSH  DE              ;SAVE DATA
35  2015  C5                     PUSH  BC              ;SAVE NUMBER STEP
36  2016  CD 209A                 CALL  STMDL           ;DELAY
37                      ;
38  2019  21 3FFD                 LD    HL,SYSFAG
39  201C  CB 86                   RES   0,(HL)          ;AUTO KEY
40  201E  3E 80                   LD    A,80H           ;DOT
41  2020  32 3FE7                 LD    (DISPY),A
42  2023  3E 02                   LD    A,SCAN          ;GET KEY
43  2025  D7                      RST   SYSCAL
44                      ;
45  2026  DD 2A 2FFE              LD    IX,(STMBUF)     ;LOAD ADDRESS DATA
46  202A  C1                      POP   BC              ;POP NUMBER STEP
47  202B  D1                      POP   DE              ;POP DATA STEP
48                      ;
49  202C  FE 04           STMR    CP    4               ;ROTATE RIGHT  KEY 4
50  202E  20 0F                   JR    NZ,STML
51  2030  CD 206B                 CALL  STMRT
52  2033  07                     RLCA
53  2034  FE 10                   CP    10H
54  2036  20 02                   JR    NZ,STMR1
55                      ;
56  2038  3E 01                   LD    A,1
57  203A  CD 207B         STMR1   CALL  STMRT1
58  203D  18 D5                   JR    STM
```


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                        ;
203F  FE 05     STML    CP      5               ;ROTATE LEFT KEY 5
2041  20 0F             JR      NZ,STMRN
2043  CD 206B           CALL    STMRT
2046  0F                RRCA
2047  FE 80             CP      80H
2049  20 02             JR      NZ,STML1
                        ;
204B  3E 08             LD      A,8
204D  CD 207B   STML1   CALL    STMRT1
2050  18 C2             JR      STM
                        ;
2052  FE 06     STMRN   CP      6               ;RUN STEP KEY 6
2054  20 BE             JR      NZ,STM
2056  DD 2B             DEC     IX              ;DATA
2058  C5                PUSH    BC              ;START STEP
2059  CD 2084   STMRN1  CALL    STMGO
205C  20 FB             JR      NZ,STMRN1
205E  C1                POP     BC
205F  CD 2084   STMRN2  CALL    STMGO           ;FINAL
2062  DD 23             INC     IX
2064  DD 23             INC     IX              ;ADDRESS+1
2066  20 F7             JR      NZ,STMRN2
                        ;
2068  3E 00     STMEN   LD      A,MON           ;END
206A  D7                RST     SYSCAL
                        ;
206B  3E 06     STMRT   LD      A,6             ;STEP ROTATE
206D  D3 02             OUT     (DIGIT),A       ;DISPLAY FLAG
206F  7A                LD      A,D
2070  DD 77 00           LD      (IX+0),A
2073  D3 01             OUT     (SEGM),A
2075  D3 20             OUT     (STMOP),A       ;OUT STEP
2077  CD 209A           CALL    STMDL
207A  C9                RET
                        ;
207B  57        STMRT1  LD      D,A             ;STEP EXECITATION
207C  DD 23             INC     IX
207E  DD 22 2FFE        LD      (STMBUF),IX     ;STEP ADDRESS
2082  03                INC     BC              ;STEP+1
2083  C9                RET
                        ;
2084  C5        STMGO   PUSH    BC
2085  3E 06             LD      A,6
2087  D3 02             OUT     (DIGIT),A       ;FLAG
2089  DD 7E 00          LD      A,(IX+0)
208C  D3 01             OUT     (SEGM),A
208E  D3 20             OUT     (STMOP),A       ;OUT
2090  CD 209A           CALL    STMDL           ;STEP DELAY
2093  C1                POP     BC
2094  DD 2B             DEC     IX
2096  0B                DEC     BC
2097  78                LD      A,B
2098  B1                OR      C
2099  C9                RET
                        ;
209A  08        STMDL   EX      AF,AF'
209B  21 1500           LD      HL,1500H        ;DELAY
                        ;
209E  2B        STMDL1  DEC     HL
209F  7C                LD      A,H
20A0  B5                OR      L
20A1  20 FB             JR      NZ,STMDL1
20A3  08                EX      AF,AF'
20A4  C9                RET
                        END
0 Error(s) Detected.
165 Absolute Bytes.  28 Symbols Detected.
```


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตัวอย่างต่อกับบอร์ด CP-32 และใช้ ET-BASIC 32 โดยต่อจาก PORT 8255 (ใช้ PORT A)

```
LIST
10      REM * TEST STEPPING MOTOR *
20      REM * CP-32 & ET-BASIC32   *
30      REM * PROGRAM BASIC 32     *
40     PC=0E0E3H
50     PA=0E0E0H
60     XBY(PC)=80H
70      FOR I=1 TO 4
80      READ A
90     XBY(PA)=A
100     GOSUB 140
110     NEXT I
120     RESTORE
130     GOTO 70
140     FOR J=1 TO 20 :  NEXT J :  RETURN
150     DATA 11H,22H,44H,88H
```

4. ตัวอย่างต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ PC กับ CARD ET-PC 8255 โดยเราสามารถต่อใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ PC มาควบคุม STEPPING MOTOR ได้

```
Program ETSMCC;

 { Ex ET-SMCC & PCET-8255      }
 { SET CARD PCET-8255 DIP SW PORT 300H  USER 8255 #1 PORT A }
 { PROGRAM TURBO PASCAL V6.0 }

  USES      CRT;
  VAR       I:BYTE;
            X:INTEGER;
  TYPE      AR_DATA  =ARRAY [1..4] OF BYTE;
  CONST     PAI=$0300;
            PCONT_1=$0303;
            DATA_OUT :AR_DATA=($11,$22,$44,$88);

   BEGIN
      PORT[PCONT_1]:=$80;    { PA1,PB1,PC1=OUTPUT PORT }
       FOR X :=1 TO 100 DO
        BEGIN
          FOR I := 1 TO 4 DO
           BEGIN
             PORT[PA1]:=DATA_OUT[I];
             DELAY(50);
           END;
        END;
   END.
```


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

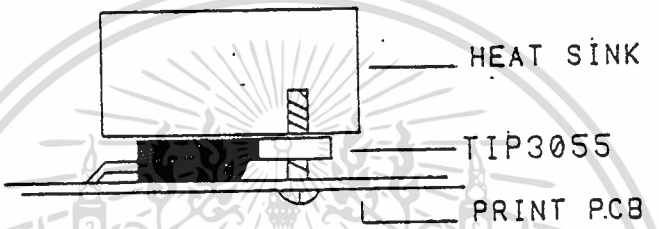
SPECIFICATIONS

		OUTPUT STEPPING MOTOR
CHANNELS	:	4 OUTPUT 2 CHANNELS
PHOTO-COUPLED	:	4 N 33
CHANNEL STATUS	:	LED DOT DISPLAY
ISOLATION VOLTAGE	:	2500V (PEAK)
OUTPUT DRIVING	:	6 A 50 V
		INPUT PHOTO-COUPLED INPUT
CHANNELS	:	4 CHANNELS
PHOTO-COUPLED	:	4 N 33
CHANNEL STATUS	:	NOT
ISOLATION VOLTAGE	:	2500V (PEAK)
HIGH SIGNAL IMMUNITY	:	3-12V Photo-Coupling ON
		0-1V Photo-Coupling OFF
		(R INPUT 1K OHM 1/4W)
CONNECTOR	:	1 40 PIN EXPANSION HEADER-STRIP
		(8255 BUS , ET-V3.0 , V3.5)
	:	2 34 PIN EXPANSION HEADER-STRIP
		(72IOZ80 BUS)
	:	2 6 PIN EXPANSION (STEPPING MOTOR)
	:	4 2 PIN EXPANSION (INPUT PHOTO-COUPLED INPUT)
	:	1 2 PIN EXPANSION POWER
POWER SUPPLY	:	COMSUMPTION 5VDC & MAIN INPUT 7VDC-12VDC POWER
		SUPPLY CURRENT 250 mA
PCB SIZE	:	13 CM X 16 CM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำแนะนำการประกอบชุด ET-SMCC

1. ควรใส่อุปกรณ์ที่มีขนาดเตี้ยๆไปหาตัวสูงๆ เช่น ควรจะเริ่มประกอบบวกตัวต้านทานก่อน , ไดโอด , ตัวเก็บประจุชนิดเล็กๆ , ซ็อคเก็ทไอซี
2. ตัวเก็บประจุที่มีขั้วต้องใส่ให้ถูกขั้วรวมทั้งไดโอดและทรานซิสเตอร์
3. การบัดกรีให้บัดกรีด้านล่างเพียงด้านเดียวเท่านั้น ด้านบนไม่ต้องบัดกรี
4. การติดตั้งและบัดกรีไอซีเรกูเลทเบอร์ 7805 และทรานซิสเตอร์ TIP3055 ให้ติดตั้งต่อดังรูป



5. การติดตั้ง HEAT SINK ให้ติดตั้งกับตัวอุปกรณ์ไม่ให้ HEAT SINK ไปชนกับ HEAT SINK ของอุปกรณ์ตัวอื่นๆด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการอุปกรณ์ ET-SMCC (STEPPING MOTOR CONTROL CARD)

RESISTER 1/4 W

1. 100 = 8 ตัว
2. 1k = 24 ตัว
3. 560 = 1 ตัว
4. R-PACK 10 K = 1 ตัว

CAPACITER

1. 220 UF 16 V = 1 ตัว
2. 470 UF 16 V = 2 ตัว หรือ 470/25
3. 220 UF 25 V = 1 ตัว
4. 0.1 UF TAN = 4 ตัว

TRANSISTOR

1. BC 547 = 8 ตัว
2. TIP3055 = 8 ตัว

DIODE

1. 1N4001 = 12 ตัว
2. LED 3MM สีเหลือง = 8 ตัว
3. LED 3MM สีแดง = 1 ตัว

IC

1. OPTO 4N33 = 12 ตัว
2. 74LS245 = 1 ตัว
3. 74LS04 = 2 ตัว
4. LM 7805 = 1 ตัว

SOCKET IC

1. SOCKET 6 PIN = 12 ตัว
2. SOCKET 14 PIN = 2 ตัว
3. SOCKET 20 PIN = 1 ตัว

CONNECTOR

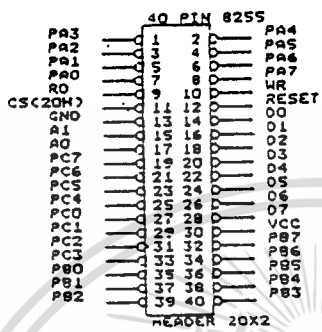
1. CONNECTOR (COM 6 P) ใหญ่ = 2 ตัว
2. CON 2 P เล็ก = 4 ตัว
3. TERMINAL 2 P = 1 ตัว
4. JACK ADAPTER = 1 ตัว
5. MINI JUPER = 12 ตัว
6. HEADDER 40 P = 1 ตัว
7. HEADDER 32 P = 1 ตัว
8. HEADDER 8X3 P = 1 ตัว
9. HEADDER 4X3 P = 1 ตัว

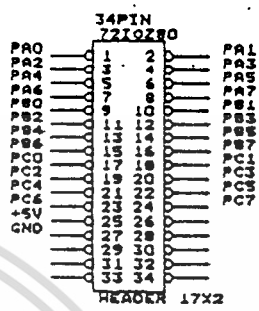
HEATSING

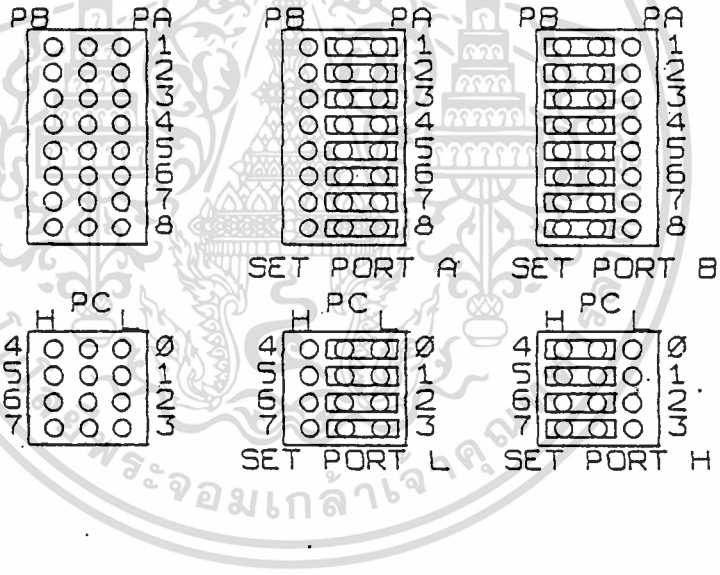
1. สีดำ = 9 ตัว

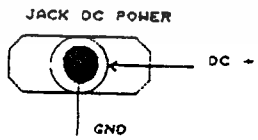
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อเชื่อมกับ CONNECTOR

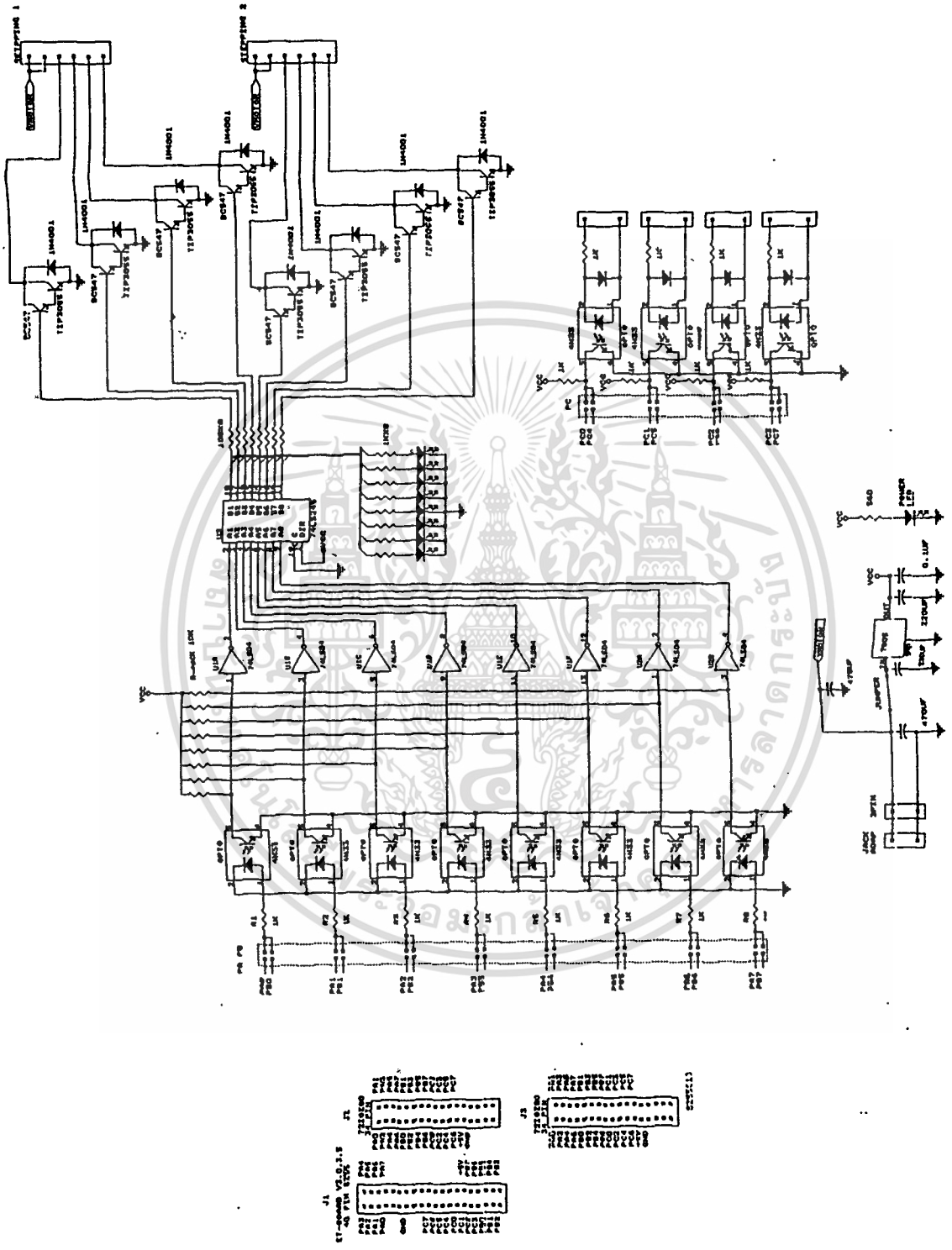








เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือวงจรควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์

CP32-BASIC

CP32-BASIC

EXPAINSION

COMMAND

V2.0

BY ETT.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CP32-BASIC

เริ่มต้นกับ CP32

เนื่องจาก CP32 ถูกออกแบบมาให้ใช้พัฒนาระบบร่วมกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล(PC) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปจำพวก COMMUNICATION PROGRAM ซึ่งก็แล้วแต่ผู้ใช้จะเลือกว่าจะใช้โปรแกรมใด แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงการใช้ CP32 ร่วมกับโปรแกรม PROCOMM PLUS ซึ่งมีขั้นตอนในการปฏิบัติดังนี้

1. RUN โปรแกรมที่จะใช้ติดต่อระหว่าง PC กับ CP32-BASIC
2. ต่อสาย RS232 จาก PC เข้ากับบอร์ด CP32
3. จ่ายไฟให้กับบอร์ด CP32
4. กด SPACE BAR บนคีย์บอร์ดของ PC

ถ้าทุกอย่างทำงานปกติ ผู้ใช้จะพบข้อความดังข้างล่างนี้

```
HELLO CP32-BASIC V1.0
By EIT.1990
READY
>
```

แต่ในกรณีที่ผู้ใช้ ใช้ CPU เบอร์ 8052AH BASIC และใช้ตัวแปลภาษาเบสิคภายในตัวของ 8052 แล้วจะพบข้อความดังนี้

```
*MCS-51(tm)-BASIC V1.1*
READY
>
```

เมื่อมาถึงตรงจุดนี้ CP32 พร้อมที่จะรับคำสั่งต่างๆจากผู้ใช้ CP32-BASIC แบ่งการทำงานออกเป็น 2 MODE คือ

COMMAND MODE หรือ DIRECT MODE กับ RUN MODE

COMMAND MODE จะเป็นการสั่งการโดยตรงซึ่ง CP32-BASIC จะทำงานตามคำสั่งทันทีที่กดคีย์ ENTER

RUN MODE คือผู้ใช้ทำการเขียนคำสั่งต่างๆโดยมีหมายเลขบรรทัด (LINE NUMBER) และจะให้ CP32 ปฏิบัติตามคำสั่งได้คือต้องสั่ง RUN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STATEMENT : โปรแกรมภาษาเบสิคประกอบขึ้นด้วยกลุ่มของคำสั่ง ซึ่งแต่ละคำสั่ง(STATEMENT) จะต้องนำด้วย หมายเลขบรรทัด (LINE NUMBER) และในหนึ่งบรรทัดอาจจะมีมากกว่า 1 คำสั่งก็ได้โดยคั่นด้วยเครื่องหมาย :

ตัวเลขที่ใช้กับ CP32-BASIC สามารถใช้ได้ทั้งเลขฐาน 10 (DECIMAL) และ เลขฐาน 16 HEXADECIMAL ,โดยที่ผู้ใช้ต้องกำหนดอักษร H ตามหลังตัวเลขฐาน 16 มิฉะนั้น CP32-BASIC จะถือว่าเป็นเลขฐาน 10 และในกรณีที่เป็นเลข HEX ที่ขึ้นต้นด้วย A-F ผู้ใช้ต้องใส่เลข 0 นำหน้าด้วยมิฉะนั้นจะถือว่าเป็นตัวแปร (VARIABLE) รายละเอียดต่างๆหาดูได้จากคู่มือ MCS BASIC52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ CP32 พัฒนาโปรแกรมควบคุมระบบ

เนื่องจากคู่มือเล่มนี้ไม่ใช่คู่มือการเขียนโปรแกรมภาษาเบสิค จึงจะไม่ขอกล่าวถึงรายละเอียดของวิธีการเขียนโปรแกรมภาษาเบสิค เพราะว่า CP32-BASIC มีลักษณะเป็นมาตรฐานเหมือนภาษาเบสิคทั่วๆ ไป แต่มีลักษณะพิเศษเฉพาะตัวอยู่บ้างซึ่งจะได้กล่าวต่อไปนี้

1. ระบบตัวเลขของ CP32-BASIC สามารถใช้ได้ทั้งเลขฐาน 10 และ เลขฐาน 16
   ตัวอย่าง

```
10 FOR I= 1 TO 10                10 FOR I=1 TO 0AH
20 PRINT"CP32-BASIC"             20 PRINT "CP32-BASIC"
30 NEXT                          30 NEXT
```

   ซึ่งทั้งสองโปรแกรมนี้จะทำงานเหมือนกันเมื่อสั่ง RUN

2. บริการการอินเตอร์รัพท์ได้ในระดับภาษาเบสิค
   ตัวอย่าง

```
10 ONEX1 100
20 ------(CONTINUE STATEMENTS)
30 ------
100 PRINT"EXTERNAL INTERUPT1"
110 RETI
```

3. สำหรับงานควบคุมบางอย่างที่ต้องการความเร็วสูง CP32-BASIC ยังสามารถ CALL โปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ได้
   ตัวอย่าง

```
10 CALL 9000H (ดูรายละเอียดการติดต่อกับภาษาแอสเซมบลี้ใน MCS-BASIC 52)
```

4. เมื่อใช้ CPU เบอร์ 8052AH BASIC สามารถโปรแกรม EPROM ได้ตั้งแต่เบอร์ 2764 ถึง 27128 ซึ่งแบ่งการโปรแกรมได้ 2 ลักษณะ คือ
   4.1 การเขียนโปรแกรมภาษาเบสิคของผู้ใช้ลงในอีพรอม
   4.2 โปรแกรมอีพรอมได้เป็นช่วงตามต้องการ โดยสามารถกำหนดได้ว่าจะให้นำข้อมูลส่วนใดในหน่วยความจำเขียนลงบนอีพรอม (ดู BPROG)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. โปรแกรมที่ถูกพัฒนาเสร็จเรียบร้อยแล้วเมื่อเก็บไว้ในอีพรอม หรือ RAM (Back up) แล้ว สามารถกำหนดให้ RUN ได้ทันทีที่เปิดเครื่องหรือมีการรีเซทระบบ (AUTO EXECUTE)
6. มี VIRTUAL DISK ซึ่งอาจเป็น RAM (Back up) หรือ EEPROM แล้วแต่ผู้ใช้จะเลือกใช้ โดยมีคำสั่งที่ใช้ติดต่อกับ V.DISK คล้ายกับ DOS. คือสามารถ SAVE,LOAD,DEL ไฟล์ได้ ดูรายละเอียดในคำสั่งเพิ่มเติมของ CP32-BASIC

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำสั่งเพิ่มเติมใน CP32-BASIC V1.0

CP32 ยังมีคำสั่งเพิ่มเติมจากที่มีอยู่ใน MCS BASIC-52 ซึ่งเป็นคำสั่งที่มีประโยชน์สำหรับผู้ใช้ที่ต้องการทำงานในระดับภาษาแอสเซมบลี้ โดยมีคำสั่งที่เพิ่มเติมดังนี้

1 **ARUN** = RUN ASSEMBLY PROGRAM

MODE : COMMAND/RUN

การทำงาน : สั่งให้ CP32 รันโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้

รูปแบบของคำสั่ง

```
>ARUN [address]
```

address หมายถึงตำแหน่งที่อยู่ของโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้

คำสั่ง ARUN ที่มิได้กำหนด address หมายถึงการรันโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ในตำแหน่งที่ทำการ DOWN LOAD หรือรันในตำแหน่งเดียวกับการสั่ง RUN ครั้งสุดท้าย

2 **BPROG** = PROGRAM BLOCK (EPROM)(8052AH BASIC)

MODE : COMMAND/RUN

การทำงาน : นำข้อมูลในตำแหน่งที่อยู่ระหว่าง Start address ถึง Endding address เขียนลงใน EPROM ในตำแหน่งที่กำหนดด้วย Destination address

รูปแบบของคำสั่ง

```
>BPROG
Starting address :0200H
Ending address   :0301H
Destination addr :8010H
Standard/Inteligen CS/I] :I (CR)
READY
```

หมายเหตุ ในขณะทำ CP32 ทำการเขียนข้อมูลอยู่นั้นจะแสดงแอดเดรสของตำแหน่งที่ทำการเขียนไปถึง โดยจะแสดงทุกๆ 128 ไบท์

- การเลือกว่า MODE การโปรแกรม STANDARD นั้นจะใช้พัลส์ในการเขียนขนาด 50 ms
- ส่วนการโปรแกรมแบบ Inteligen นั้นจะใช้พัลส์ในการเขียน 1 ms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำแนะนำ ก่อนการใช้คำสั่ง EPROG ผู้ใช้ควรเลือก VPP ที่จะใช้ให้เหมาะสมกับ EPROM ที่จะนำมาโปรแกรม ถ้าผู้ใช้มี VPROG CARD เสียบอยู่ที่ EXP1 อาจใช้คำสั่ง VPROG+ ในการเลือกVPP ถ้าฮาร์ดแวร์ของ VPROG CARD ได้ออกแบบมาให้เหมาะสมกับ LOGIC OUTPUT ของ EXP1(ดูรายละเอียดทางฮาร์ดแวร์ในภาคผนวก)

3 CLS = CLEAR SCREEN

MODE : COMMAND/RUN

การทำงาน : ลบหน้าจอและนำ CURSOR ไปที่ตำแหน่งมุมบนซ้ายของจอภาพ

รูปแบบของคำสั่ง

>CLS

คำแนะนำ คำสั่ง CLS นี้ใช้ไม่ได้กับบาง TERMINAL เพราะในแต่ละ TERMINAL จะต้องการ CONTROL CODE ไม่เหมือนกัน ฉะนั้นคำสั่งนี้จึงใช้เพียงเพื่ออำนวยความสะดวกสำหรับผู้ที่เคยใช้คำสั่ง CLS ในการลบจอเท่านั้น

4 DEL = DELETE (ดูคำสั่ง SAVE,DIR ประกอบ)

MODE : COMMAND

การทำงาน : ลบโปรแกรมภาษาเบสิค (File(s)) ที่อยู่ใน VDISK

รูปแบบของคำสั่ง

>DEL * : เป็นการลบ File ที่มีอยู่ทั้งหมดใน VERSUAL DISK

>DEL ROMn : สำหรับ File ที่ไม่มีชื่อ (No Name) ก็สามารถลบได้โดยกำหนดตำแหน่งของ File ได้จาก REF./LOC(ดู DIR)

ตัวอย่าง

>DEL ROM3

>DEL "File name" :เป็นการลบ File ใน VDISK ที่มีชื่อตรงกับชื่อที่ตามหลังคำสั่ง DEL

ตัวอย่าง

>DEL "PROGRAM1"

หมายเหตุ 1.การลบแบบใช้ชื่อนี้ ชื่อ File จะต้องอยู่ในเครื่องหมายคำพูด

2.ส่วนการลบ File จาก REF./LOC (ROMn) นั้นไม่ต้องมีเครื่องหมายคำพูด

3.ในกรณีที่มีการลบโดยมิได้ตั้งใจ (DEL *) ผู้ใช้สามารถกู้ File กลับมาได้โดยการใส่ข้อมูล 55H ลงในตำแหน่ง 8010H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.File ที่ถูกลบไปแล้วไม่สามารถกู้กลับคืนได้ (ยกเว้นในกรณีข้อ 3)

5.การลบ File ถ้าผู้ใช้ ใช้ EEPROM เป็น VDISK การ DEL หรือ SAVE จะกระทำได้ช้ากว่าใน RAM (Back up)

5 **DIR** = DIRECTORY (ดูการปรับปรุงใน V2.0)

MODE : COMMAND

การทำงาน : แสดง File(s) ที่มีอยู่ทั้งหมดใน VDISK

รูปแบบของคำสั่ง

> DIR

ตัวอย่าง

>DIR

REF/LOC.	FILE NAME	SIZE	REF/LOC.	FILE NAME	SIZE
Rom01	CRAM	54	Rom02	BSHOW	270
Rom03	MOVECODE	104	Rom04	BURN	454
Rom05	No name	90			

5 File(s)

READY

จะเห็นว่าในบรรทัดแรก จะมีตัวแปร 3 ตัวซึ่งมีความหมายดังนี้

- REF/LOC.(Refference location) หมายถึงตำแหน่งของโปรแกรมภาษาเบสิค เรียงตามลำดับ
- FILE NAME หมายถึงชื่อของโปรแกรมภาษาเบสิคที่ผู้ใช้กำหนดในคำสั่ง SAVE
- SIZE หมายถึง ขนาดของโปรแกรมภาษาเบสิค
- No name หมายถึง โปรแกรมภาษาเบสิคที่ถูก SAVE ด้วยคำสั่ง EIPROG

6 **DLOAD** = DOWN LOAD (ดูการปรับปรุงใน V2.0)

MODE : COMMAND/RUN

การทำงาน : รับข้อมูล INTEL HEX FORMAT จากเครื่อง PC

รูปแบบของคำสั่ง

>DLOAD หมายถึง การรับข้อมูลมาแล้วนำไปเก็บในแอดเดรสที่กำหนดโดย ORIGIN address ที่ส่งมากับ INTEL HEX FORMAT

>DLOAD [offset] หมายถึง การรับข้อมูลมาแล้วนำไปเก็บในตำแหน่งที่กำหนดโดย ORIGIN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บวกด้วยค่าของ Offset address

7.DUMP = DUMP

MODE : COMMAND/RUN

การทำงาน : นำข้อมูลที่มีอยู่ในหน่วยความจำที่กำหนดโดย Start address และ Final address มาแสดงบนจอ โดยจอจะถูกแบ่งเป็น 3 ฟิลด์ ฟิลด์แรกคือตำแหน่งของข้อมูล ฟิลด์ที่สองคือข้อมูล HEX และฟิลด์ที่สามคือ ASCII ของข้อมูลนั้น

รูปแบบของคำสั่ง

>DUMP : ไม่กำหนดแอดเดรส หมายถึง นำข้อมูลที่ต่อจากการ DUMP ครั้งก่อนมาแสดงบนจอ

>DUMP 8010H :กำหนด Start address หมายถึงการนำเอาข้อมูลในตำแหน่งที่เริ่มต้นด้วยตำแหน่งที่กำหนดอยู่หลังคำสั่ง DUMP ขึ้นมาแสดงเป็นจำนวน 10 บรรทัด

>DUMP 8010H,8040H หมายถึงการนำข้อมูลในช่วงที่กำหนดขึ้นมาแสดง

ตัวอย่าง

```
>DUMP 8010H,806FH
 8010H  00 0C 00 00 96 22 43 52 - 41 4D 32 22 0D 12 00 64  ....."CRAM2"...d
 8020H  A0 49 EA 38 30 30 30 48 - A6 39 46 46 46 48 0D 09  .I.8000H.9FFFH..
 8030H  00 6E 85 49 2C AA 2C 0D - 0A 00 78 BD E0 49 29 EA  .n.I,.,....x..I).
 8040H  30 0D 05 00 82 97 0D 01 - 55 0C 00 00 96 22 43 52  0.......U...."CR
 8050H  41 4D 33 22 0D 0C 00 00 - 96 22 43 52 41 4D 32 22  AM3".....CRAM2"
 8060H  0D 12 00 64 A0 49 EA 38 - 30 30 30 48 A6 39 46 46  ...d.I.8000H.9FF

READY
```

8 ENTER = ENTER

MODE : COMMAND/RUN

การทำงาน : ใส่ข้อมูลลงในหน่วยความจำโดยตรง ผู้ใช้สามารถกำหนดค่าลงในหน่วยความจำในตำแหน่งที่ต้องการ

รูปแบบของคำสั่ง

>ENTER -ถ้าผู้ใช้ไม่กำหนดแอดเดรส CP32 จะให้ค่าเริ่มต้นในแรมที่ตำแหน่ง 0200H

>ENTER 1000H - มีการกำหนดแอดเดรส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง

```
>ENTER  1000H
1000H:00
:0A5H          - CP32 จะหยุดรอให้ผู้ใช้ใส่ข้อมูล
1001H:00       - และจะนำข้อมูลไบท์ถัดไปมาแสดง
:              - และรอการใส่ข้อมูล
```

ถ้าผู้ใช้ต้องการหยุดการใส่ข้อมูลเพียงนั้นให้กด ENTER เป็นการจบสิ้นขบวนการของคำสั่ง ในกรณีที่ผู้ใช้ต้องการใส่ข้อมูลหลายไบท์ติดต่อกันในครั้งเดียวกันก็ทำได้โดยการใส่ข้อมูลและแต่ละข้อมูลคั่นด้วยเครื่องหมาย","

ตัวอย่าง ใส่ข้อมูลจำนวน 4 ไบท์ (12H, 13H, 14H, 15H)

```
>ENTER 1000H
1000H:A5
:12H,13H,14H,15H (CR)
1004H:00
:              (CR)
```

9 ETPROG = ET.PROGRAM

MODE : COMMAND/RUN

การทำงาน : การทำงานเหมือนคำสั่ง PROG ใน 8052AH.BASIC คือเป็นการนำเอาโปรแกรมภาษาเบสิคไปเก็บลงในหน่วยความจำตำแหน่ง 8010H เป็นต้นไป โดย CP32 จะหาตำแหน่งที่จะนำข้อมูลไปใส่เองในกรณีที่ในตำแหน่ง 8010H มีโปรแกรมเก็บอยู่ก่อนแล้ว

รูปแบบของคำสั่ง

```
>ETPROG
 Being copy to ROM01
 Programming start at 8010H

 READY
 >
```


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ 1. ในขณะที่ CP32 ทำคำสั่ง EIPROG อยู่นั้นอาจใช้เวลานานกว่าปกติ ถ้าผู้ใช้ใส่ EEPROM ในตำแหน่ง 8000H

2. บนบอร์ด CP32 ถ้าผู้ใช้ใส่ CPU เบอร์ 8032 ห้ามใช้คำสั่งที่เกี่ยวกับการ PROGRAM EPROM เช่น PROG,PGM,PROG1-6 หรือ FPROG1-6 โดยเด็ดขาด

10 FILL = FILL

MODE : COMMAND/RUN

การทำงาน : นำข้อมูลที่กำหนดใส่ลงในหน่วยความจำตำแหน่งที่เริ่มด้วย Start Address ถึง Final address

รูปแบบของคำสั่ง

>FILL <Start address>,<final address>

ตัวอย่าง ใส่ข้อมูล A5H ลงในตำแหน่ง 1000H ถึง 100FH

```
>FILL 1000H,100FH,0A5H
READY
>
```

11 LOAD = LOAD (ดู LOADX ด้วย)

MODE : COMMAND

การทำงาน : นำโปรแกรมภาษาเบสิคใน VDISK มาไว้ใน RAM เพื่อทำการแก้ไขหรือทดลองต่อไป

รูปแบบของคำสั่ง

>LOAD ROM3 - หมายถึงการนำโปรแกรมภาษาเบสิคโปรแกรมที่ 3 มาไว้ใน RAM การ LOAD ด้วย Ref/loc.นี้ไม่ต้องใส่เครื่องหมายคำพูด

>LOAD "File name"- หมายถึงการนำโปรแกรมภาษาเบสิคที่มีชื่อตรงกับชื่อ ที่กำหนดหลังคำสั่ง LOAD มาไว้ใน RAM

ตัวอย่าง

```
>LOAD "PROGRAM1"
 READY
>
 LOAD ROM2      (ไม่ต้องใส่เครื่องหมายคำพูด)
 READY
>
```


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12 **MOVE** = MOVE

MODE : COMMAND/RUN

การทำงาน : ย้ายข้อมูลเป็นบล็อคโดยเริ่มจาก Start address ไปจนถึง Final address ไปไว้ในตำแหน่งที่กำหนดโดย Destination address คำสั่ง MOVE นี้สามารถย้ายข้อมูลในลักษณะทับตัวเองได้

รูปแบบของคำสั่ง

MOVE <Start addr>,<Final addr.>,<Destination addr>

ตัวอย่าง ย้ายข้อมูลที่ 0200H ถึง 0301H ไปไว้ที่ 8010H

```
>MOVE 0200H,0331H,8010H

READY
>
```

13 **SAVE** = SAVE

MODE : COMMAND

การทำงาน : เหมือนกับคำสั่ง ETPROG แต่สามารถตั้งชื่อไฟล์ได้ โดยชื่อไฟล์ต้องยาวไม่เกิน 8 ตัวอักษร และตัวอักษรตัวใหญ่จะมีความหมายไม่เหมือนกับอักษาตัวเล็ก ชื่อไฟล์จะต้องอยู่ในเครื่องหมายคำพูด (โดยอาจจะละเครื่องหมายคำพูดปิดได้)

รูปแบบของคำสั่ง

```
>SAVE "File name"
```

ตัวอย่าง

```
>SAVE "MYFILE"
 READY
>
```

คำแนะนำ 1 ในการเขียนโปรแกรมภาษาเบสิคไม่ควรเริ่ม หมายเลขบรรทัดที่ 0 เพราะในขณะที่ทำคำสั่ง SAVE นั้น CP32 จะเพิ่มบรรทัดที่ 0 ขึ้นอีก 1 บรรทัด เพื่อทำการเก็บชื่อไฟล์ แต่ในขณะที่ LOAD โปรแกรมกลับด้วย คำสั่ง LOAD จะไม่พบ หมายเลขบรรทัด 0 แต่ถ้าผู้ใช้จะมีหมายเลขบรรทัด0 ก็จะไม่ทำให้เกิดการผิดพลาดในโปรแกรมแต่อย่างใด

2. ในขณะที่ทำคำสั่ง SAVE นั้น ถ้าผู้ใช้ใส่ EEPROM ในตำแหน่ง 8000H จะทำให้การ SAVE โปรแกรมเสียเวลานานกว่าการใช้ RAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14 UPLOAD = UP LOAD (ดูการปรับปรุงใน V2.0)

MODE : COMMAND/RUN

การทำงาน : ส่งข้อมูลจากตำแหน่งที่กำหนดโดย Start address ถึง Final address ไปยัง PC. โดยอยู่ในรูปของ INTEL HEX FORMAT

รูปแบบของคำสั่ง

```
>UPLOAD 8010H,805FH
 Strike any key when ready..
 :1080100000000C000096224352414D32220D120064A2
 :10802000A049EA3830303048A6394646464800D095E
 :1080300000 6E85492CAA2C0D0A0078BDE04929EA7A
 :10804000300D050082970D01550C000009622435219
 :10805000414D33220D0C000096224352414D3222F5
 :00000001FF
 READY
```

หมายเหตุ เมื่อ CP32 แสดงคำว่า "Strike any key when ready." หมายถึงให้ผู้ใช้เตรียมการรับไฟล์ด้วยโปรแกรมที่ใช้ติดต่อกับ CP32 (PROCOMM PLUS) เมื่อเรียบร้อยแล้วให้กดคีย์ใดก็ได้ CP32 จะทำการส่ง File ตามที่กำหนดทันที ในกรณีที่ผู้ใช้มิได้กดคีย์ใดๆCP32 จะรออยู่ 30 วินาที แล้วจะทำการส่งไฟล์ทันที

ขั้นตอนต่างๆ ในการรับ-ส่ง File ต้องศึกษาเอาจากคู่มือของโปรแกรมสื่อสารนั้นๆ

15 VPROG = VOLTAGE PROGRAM EPROM

MODE : COMMAND/RUN

การทำงาน : ให้ LOGIC OUTPUT ทางพอร์ต 1 เพื่อสนับสนุนผู้ใช้ที่มี VPROG CARD โดยจะให้ OUTPUT ดังนี้

P1.7	P1.6	VPP(Volts)
1	1	12.5
1	0	13
0	1	21
0	0	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบของคำสั่ง

>VPROG + หมายถึง Turn on VPROG.

>VPROG - หมายถึง Turn off VPROG.

ตัวอย่าง เลือกไฟสูงสำหรับโปรแกรม EPROM ขนาด 21 volts

```
>VPROG +

SELECT VPP..[A-D]
A.12.5V
B.13V
C.21V
D.25V

Select one :C
READY
```

หมายเหตุ 1. สำหรับผู้ใช้ที่ต้องการทำ VPROG CARD ให้ดูรายละเอียดทางฮาร์ดแวร์ได้จากภาคผนวก

2. สำหรับผู้ที่ไม่ต้องการทำ VPROG ก็ให้นำแหล่งจ่ายไฟตรงตามขนาดที่ต้องการ จ่ายเข้าทางคอนเนคเตอร์ VPROG ซึ่งอยู่ทางมุมล่างขวาของบอร์ด CP32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทำ SOURCE BASIC PROGRAM

การทำ SOURCE BASIC PROGRAM อาจแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ

1. เขียนในขณะที่อยู่ใน COMMAND MODE ของ CP32
2. ใช้ EDITOR เป็นเครื่องมือในการเขียน เช่น SIDE KICK เป็นต้น

ในกรณีที่ใช้ EDITOR เขียนโปรแกรมขึ้นมานั้นเราจะได้ TEXT FILE ไฟล์หนึ่ง ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้อีก เพราะว่า ไฟล์จะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำสำรองบน PC ก่อนที่จะส่งให้ CP32 ส่วนในกรณีที่ 1 นั้นในขณะที่ทำการเขียนโปรแกรมอยู่ถ้าเกิดมีปัญหาขึ้นก็อาจทำให้สูญเสียโปรแกรมไปก่อนที่เราจะทำการเก็บโปรแกรมไว้ แต่ว่าเมื่อเราใช้โปรแกรม PROCOMM PLUS แล้วเราก็ยังมีโอกาสที่จะเก็บไฟล์โปรแกรมภาษาเบสิคไว้ใน DISK จริงๆ ได้ โดยมีกรรมวิธีดังนี้

1. เมื่อเขียนไฟล์เสร็จแล้วให้ทำการเปิด LOG file ในโปรแกรม PROCOMM โดยการ
   - กด ALT-F1 โปรแกรมจะให้ตั้งชื่อไฟล์ซึ่งในขั้นตอนนี้ให้ผู้ใช้ตั้งชื่อที่เป็นชื่อของโปรแกรมภาษาเบสิคที่ต้องการจะเก็บ
   - ใช้คำสั่ง LIST ไฟล์จะถูก LIST ขึ้นมาที่หน้าจอจนจบ
   - กด ALT-F1 อีกครั้งเป็นการปิด LOG file เท่านี้เราก็จะได้ โปรแกรมภาษาเบสิคที่เราเขียนด้วย CP32 ไว้ใน DISK ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้
2. ใช้คำสั่งเก็บไฟล์ไว้ในรูปของ HEX โดยมีขั้นตอนดังนี้
   - ทำการเปิด LOG file เหมือนเดิม
   - ใช้คำสั่ง UPLOAD ส่งโปรแกรมไปเก็บไว้ในรูปของ HEX ซึ่งไฟล์จะมีขนาดเล็กลงและสามารถ ใช้คำสั่ง DLOAD นำข้อมูลกลับลงในหน่วยความจำได้โดยตรง โดยไม่ต้องผ่านตัวแปลภาษาเบสิค
   - ตัดส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยเรียกไฟล์ที่ได้เข้าไปใน SIDE KICK และทำการลบส่วนที่ไม่ต้องการออก และ SAVE กลับไปใหม่

นอกจากนี้เรายังสามารถทำ "ฮาร์ดกอปปี้" โปรแกรมภาษาเบสิคของเราได้อีกในกรณีที่ต้องการเอกสารอ้างอิง โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ต่อ PRINTER เข้ากับเครื่อง PC
- สั่ง Turn on printer โดย กด ALT-L
- ใช้คำสั่ง LIST
- ในขณะที่ CP32 ทำการ LIST โปรแกรมขึ้นที่หน้าจอ PROCOMM ก็จะทำการส่งตัวโปรแกรมนั้นออกทาง PRINTER ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

เนื่องจากการพัฒนาโปรแกรมควบคุมบนบอร์ด CP32 ร่วมกับ CP32-BASIC V 2.0 นั้นมีปัญหาของผู้ใช้คือ ต้องนำโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนั้นไปโปรแกรมลงในอีพรอม ด้วยเครื่องโปรแกรมอีพรอม ซึ่งอาจจะเกิดความไม่สะดวกขึ้นกับผู้ใช้บางท่าน ทางบริษัท อี ที ที จึงพัฒนาการ์ดโปรแกรมอีพรอมขนาดเล็กขึ้นมา ซึ่งให้ชื่อว่า EPP และได้เพิ่มคำสั่งให้กับ CP32-BASIC อีก 2 คำสั่ง เพื่อทำหน้าที่เกี่ยวกับการโปรแกรมอีพรอม ซึ่งคำสั่งมีลักษณะเหมือนกับคำสั่ง PROG ใน 8032 AH-BASIC ซึ่งทำให้ผู้ใช้สามารถใช้บอร์ด CP32 ในงานควบคุมได้สะดวก และโดยเฉพาะอย่างยิ่งประหยัดต้นทุน และเวลาอันมีค่า

CP32-BASIC V3.0 นี้ใช้ได้กับบอร์ด CP32 และ CPAT32.

ทีมงานอีทีที

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สารบัญ

	หน้า
คำสั่งเพิ่มเติมใน CP32-BASIC V3.0	1
ตัวอย่างการทำ EPROM สำหรับการทำ AUTO EXECUTE	1
การใช้งานบอร์ด EPP (บอร์ดโปรแกรมอิพรอมขนาดเล็ก)	2
หน้าที่ของคำสั่ง	
- WRITE	3
- BWRITE	3
การติดตั้ง	4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำสั่งเพิ่มเติมใน CP32-BASIC V3.0

ใน CP32-BASIC V3.0 นี้ ได้เพิ่มคำสั่งขึ้นอีก 2 คำสั่ง นอกนั้นยังคงเดิม ทางบริษัท อีทีที จำกัด จึงจัดทำส่วนของคำสั่งที่เพิ่มเติมเป็นใบแทรกอย่างที่ท่านผู้ใช้เห็นอยู่นี้ คำสั่งที่เพิ่มเติมได้แก่

- WRITE,WRITEn ทำงานเหมือนคำสั่ง PROG ของ 8052 AH-BASIC ตัว n ในคำสั่ง WRITE คือตัวเลข 1-6 ซึ่งทำงานเหมือน PROG1-PROG6 หรือ ETPROG 1-6 (ใน V1.0,V2.0)
- BWRITE เป็นคำสั่งนำข้อมูลในหน่วยความจำช่วงใดช่วงหนึ่ง เขียนลงใน EPROM

ทั้งสองคำสั่งจะเป็น COMMAND ไม่ใช่ STATEMENT คือไม่สามารถเขียนไว้ในตัวโปรแกรมได้

<u>ตัวอย่าง</u> ต้องการทำ AUTO EXECUTE (รันโปรแกรมทันทีเมื่อจ่ายไฟเข้าระบบหรือหลังจากกด RESET)

เมื่อเข้าสู่ COMMAND MODE แล้วให้พิมพ์โปรแกรมดังนี้

```
> 10 CLS
> 20 FOR I = 1 TO 10
> 30 PRINT "TEST CP32 V3.0
> 40 NEXT I
```

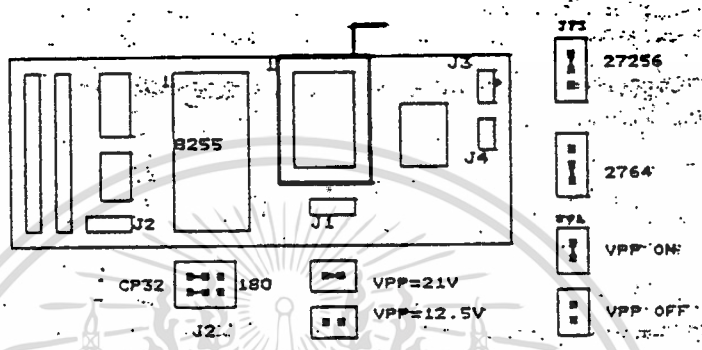
นำ EPROM ใส่ลงใน TEXTOOL บนบอร์ด EPP

```
> WRITE (เขียนข้อมูลลงใน EPROM)
> WRITE 2 (ทำ AUTO EXECUT)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานบอร์ด EPP (เครื่องโปรแกรมอีพรอม)

เนื่องจากบอร์ด EPP เป็นบอร์ดโปรแกรมอีพรอมขนาดเล็ก ทำการโปรแกรมอีพรอมได้ 2 เบอร์ คือ 2764(8KB) และ 27257(32KB) และเลือก VPP ได้ 2 ระดับ คือ 12.5V กับ 21V.



รูปที่ 1 แสดงตำแหน่ง JUMPER ต่าง ๆ และการเซท

วิธีการใช้

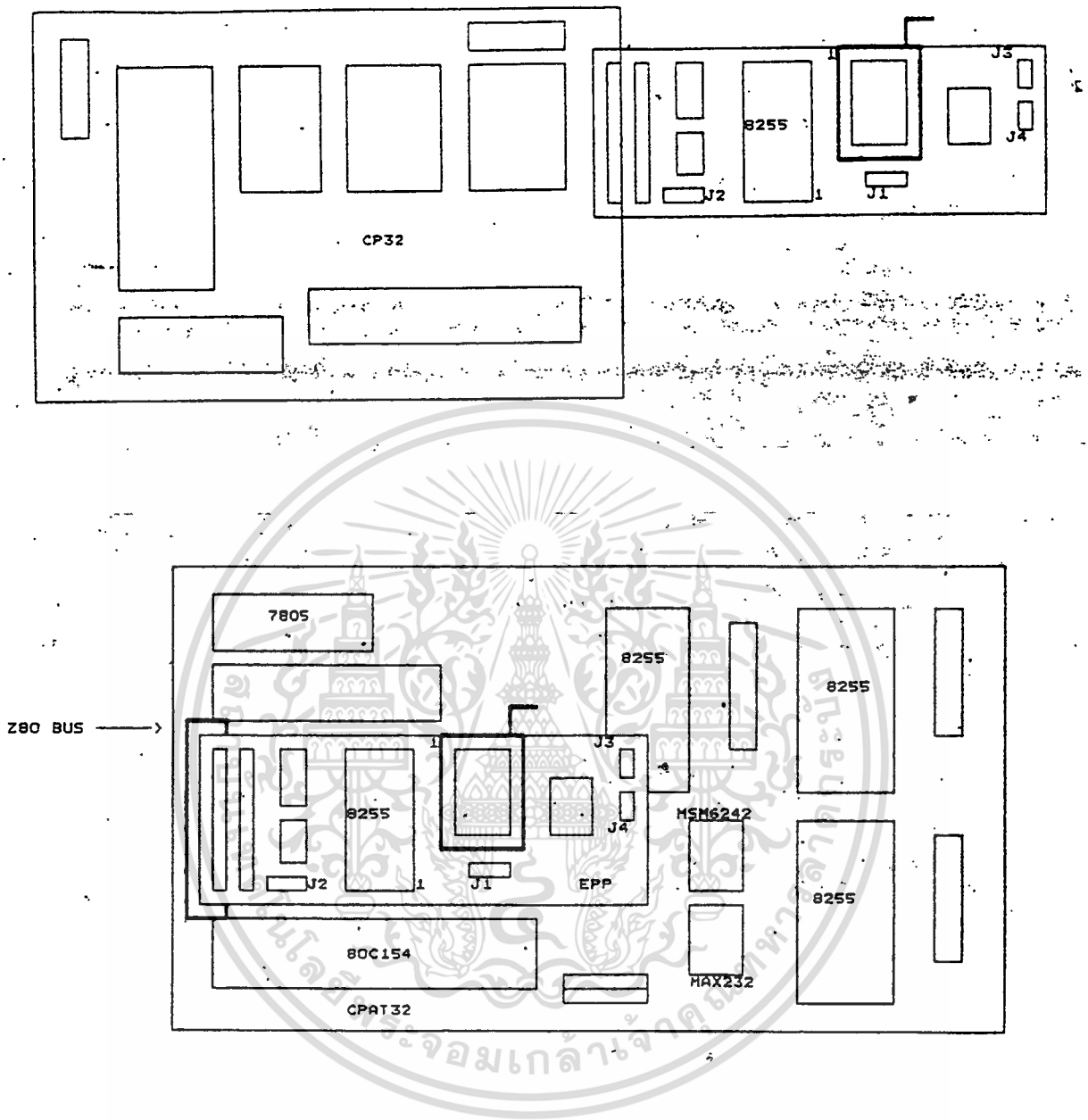
1. เสียบบอร์ด EPP เข้ากับบอร์ด CP32 หรือ CP AT-32 ตามรูปที่ 2
2. เลือก เบอร์อีพรอมโดยการเซท J3 ตามรูปที่ 1
3. เลือก VPP โดยการเซท J1
4. เซทสัญญาณ RESET ตามชนิดของบอร์ดที่ใช้กับ EPPในที่นี้เซทไว้ที่ CP32 (JUMPER อยู่ใกล้กับขา 40 ของ 8255)
5. J4 จะทำหน้าที่ตัดหรือต่อไฟ VPP เข้าที่ TEXTOOL เมื่อให้บอร์ด EPP กับ EPROM ให้ใส่ JUMPER ไว้ได้เลย

ข้อควรระวังถ้านำ RAM PACK (BACKUP) มาใช้กับ EPP ให้ถอด JUMPER J4 ออกก่อนใช้คำสั่ง WRITE หรือ BWRITE

เท่านี้ การ์ด EPP ก็พร้อมที่จะให้ใช้งาน ต่อไปเป็นหน้าที่ของผู้ใช้ว่าจะทำการโปรแกรมอีพรอมแบบใดในคำสั่งที่มีอยู่คือ WRITE และ BRITE

ถ้าใช้คำสั่ง WRITE จะต้องมีโปรแกรมภาษาเบสิคอยู่ในหน่วยความจำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 ก. และ 2 ข. การใช้ EPP กับ CP32 หรือ CP AT32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่ของคำสั่ง

คำสั่ง : WRITE

โหมด : COMMAND

หน้าที่ : นำโปรแกรมภาษาเบสิคที่ BASIC POINTER ชี้อยู่ (อาจจะอยู่ใน RAM 200H หรือ ROM 8000H) ไปเขียนลงใน EPROM บนบอร์ด EPP โดยไม่ต้องมีการกำหนดตำแหน่งแอดเดรสของข้อมูล เมื่อใช้คำสั่ง WRITE โปรแกรมจะตรวจสอบว่าในอีพรอมมีโปรแกรมภาษาเบสิคอยู่ก่อนหรือไม่ถ้ามีอยู่ก็จะทำการโปรแกรมต่อท้ายโปรแกรมแรก การใช้คำสั่ง WRITE ตามด้วยเลข 1-6 จะทำงานเหมือนคำสั่ง PROG1-6 (ดูได้จากคู่มือ MCS 52) เช่น WRITE 2 จะทำ AUTO RUN โปรแกรมแรกในหน่วยความจำตำแหน่ง 8011H เมื่อจ่ายไฟเข้าระบบ หรือหลังจากการกดรีเซท

คำสั่ง : BWRITE (BLOCK WRITE)

โหมด : COMMAND

หน้าที่ : นำข้อมูลช่วงใดช่วงหนึ่งตามที่กำหนดเขียนลงในอีพรอมตามตำแหน่งที่กำหนด โดยตำแหน่งของอีพรอมจะเริ่มจาก 0000-1FFFH เมื่อเซท J3 ไว้ที่ 2764 และ 0000-7FFFH เมื่อเซท J3 ไว้ที่ 27256

ตัวอย่าง นำข้อมูลที่ 200H ถึง 220H ไปไว้ที่ 1000H บนอีพรอม

```
> BWRITE 200H,220H,1000H
```

ตัวอย่าง นำโปรแกรมเบสิคไว้ยังตำแหน่ง 2000H บนอีพรอม

```
> BWRITE 200H,220H+LEN,2000H
```

หมายเหตุ

1. ทั้งสองคำสั่งผู้ใช้ต้องตรวจสอบความยาวของข้อมูลเองว่าเกินความจุของตัวอีพรอมหรือไม่

โดยที่ - EPROM 2764 มีความจุ 8,192 ไบท์ (0 - 1FFFH)

- EPROM 27256 มีความจุ 32,768 ไบท์ (0 - 7FFFH)

ถ้าต้องการตรวจสอบความยาวของโปรแกรมภาษาเบสิคที่จะเขียนลงในอีพรอมทำได้โดย

```
> PRINT LEN
```

เครื่องจะแสดงความยาวของโปรแกรมให้ทราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เมื่อทำขั้นตอนของการโปรแกรมเสร็จแล้วนำอีพรอมมาเสียบที่ตำแหน่ง 8000H และพร้อมที่จะใช้ตามที่ทำขบวนการของคำสั่ง WRITE เอาไว้

3. สำหรับผู้ที่มีบอร์ด CP32 แล้วนำบอร์ด EPP ไปใช้แล้วพบว่าใช้ไม่ได้ ให้เปลี่ยน R กรงขาริเซทจากเดิม 8.2 K เป็น 1-2 K ก็จะใช้ได้ตามปกติ

การติดตั้ง

1. CP32-BASIC V3.0 กับบอร์ด CP32

- นำ EPROM CP32-BASIC V3.0 ใส่ลงใน SOCKET U3 ใกล้ CPU
- ต่อสาย RS 232 เข้ากับ PC อีกด้านหนึ่งต่อกับคอนเนคเตอร์ 4 ขา สำหรับ RS 232

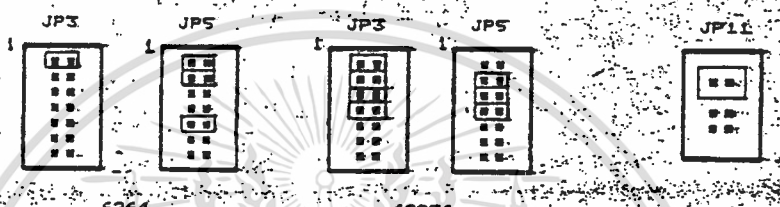
2. CP32-BASIC V3.0 กับบอร์ด CP AT32

- นำ EPROM CP32-BASIC V3.0 ใส่ลงในตำแหน่งซอกเก็ต U3 เซท JUMPER ต่าง ๆ ดังนี้

รูปที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตำแหน่ง U4 ใส่ RAM 6264 หรือ 62256 และเซท JP3 และ SP5 ดังนี้



รูปที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

คู่มือที่ท่านถืออยู่นี้เป็นคู่มือการใช้งานคำสั่งภาษาเบสิคเพิ่มเติมของ CP32-BASIC V2 ซึ่งได้มีการแก้ไขปรับปรุงและเพิ่มเติมคำสั่งจาก VERSION 1.0 ทำให้ผู้ใช้ CP32-BASIC มีความคล่องตัวในการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบด้วยภาษาเบสิค อีกทั้งยังได้ขยายขีดความสามารถของ CP32-BASIC ให้มีความสามารถในการแปลภาษาแอสเซมบลี้ของ CPU ในตระกูล MCS-51 ได้ เหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการใช้ภาษาเบสิคติดต่อกับภาษาแอสเซมบลี้ อีกทั้งยังเพิ่มความสามารถในการทำ RENUM(ber) ซึ่งแก้ปัญหาในการสอดแทรกหมายเลขบรรทัดในภาษาเบสิค นอกจากนี้คำสั่ง UP LOAD หรือ DOWN LOAD ไฟล์ ยังพัฒนาให้ติดต่อกับ DISK DRIVE ได้โดยตรง

คู่มือเล่มนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือในส่วนแรกจะเป็นคำสั่งเดิมที่มีอยู่ใน VERSION 1.0 และส่วนที่สองจะกล่าวถึงคำสั่งที่เพิ่มเติมและปรับปรุงแก้ไขต่างๆ หมายถึงผู้ใช้ที่ใช้คู่มือเล่มนี้จะสามารถใช้ได้ทั้ง VERSION 1.0 และ VERSION 2.0 ส่วนรายละเอียดของบอร์ด CP32 นั้นได้จัดทำแยกต่างหาก

หากท่านผู้ใช้ CP32-BASIC พบปัญหาใดๆ หรือ มีปัญหาในการพัฒนาระบบด้วยภาษาเบสิค กรุณาแจ้งมาที่ บ.อีทีที ทางบริษัทยินดีให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณ

บริษัท อีทีที จำกัด
1108/32 ศูนย์การค้าพระโขนง ถ.สุขุมวิท
กรุงเทพฯ 10110 โทร.3917215-6

สารบัญ

เริ่มต้นกับ CP32 1
การใช้ CP32 พัฒนาโปรแกรมควบคุมระบบ 3
คำสั่งเพิ่มเติมใน CP32-BASIC
- ARUN :Run assembly program 5
- BPROG :Block programming 5
- CLS :Clear screen 6
- DEL :Delete file(s) 6
- DIR :Directory 7
- DLOAD :Down load INTEL hex format 7
- DUMP :Dump screen 8
- ENTER :Enter data to specified memory 8
- ETPROG :ETT save program 9
- FILL :Fill data to specified range of memory 10
- LOAD :Load file from VIRTUAL DISK 10
- MOVE :Move block of memory 11
- SAVE :Save basic file to VIRTUAL DISK 11
- UPLOAD :Up load data to PC 12
- VPROG :Voltage to program EPROM 12
วิธีทำ SOURCE BASIC PROGRAM 14
ผนวก ก.
- การเซ็ท DIP.SW และ JUMPER 15
- คำเตือน 16
ผนวก ข.
- MEMORY MAP & MEMORY USAGE 18
- การดีโค้ดเอร์ต 19
คำสั่งเพิ่มเติมใน V2.0 20
- ASMS :Single line assmebly 20
- EDIT :Basic line edit 21
- RENUM :Renumber 23
- VERIFY / VERIFYC 24
- ASM / ASM# 25
- TEDIT :Text editor 29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

- UPLASM :Up load ASM.program 33
- DLASM :Down load ASM.program 34
- LOADX :Load basic file from current drive 34
คำสั่งที่ปรับปรุงจาก V1.0 35
- DLOAD :Down load hex file from current drive 35
- UPLOAD :Up load hex file to disk drive 36
- DIR :Directory (DOS) 36
การใช้งาน CP32 ร่วมกับ PROCOMM PLUS 37
- การส่งไฟล์จาก PC ไปยังบอร์ด CP32 37
- การรับไฟล์จาก PC 37
- การตั้งค่า Character pacing และ Line pacing 37
- การกำหนด Solfware flow control (XON/XOFF) 38
- การทำ Auto Execute 39
- ตัวอย่างโปรแกรม 40

คำสั่งเพิ่มเติมใน V2.0

1. คำสั่ง ASMS จะทำการแปลภาษาแอสแซมบลี้ที่ผู้ใช้พิมพ์เข้าไปให้เป็นภาษาเครื่องโดย CP32-BASIC จะทำการแปลแบบบรรทัดต่อบรรทัด โดยในการเขียนภาษาแอสแซมบลี้เมื่ออยู่ในคำสั่ง ASMS นี้ ผู้ใช้สามารถเขียนได้ใกล้เคียงกับมาตรฐานดังนี้ :-

- สามารถอ้างถึง LABLE ที่กำหนดไว้ในบรรทัดที่ผ่านมาแล้ว (BACKWARD REFERENCED LABEL)
- ใช้คำสั่งเทียม EQU ในการกำหนดค่าให้กับตัวแปรหรือ LABEL ก็ได้
- ใช้เครื่องหมาย $ ในการกำหนดตำแหน่ง
- ใช้เครื่องหมาย + , - ร่วมกับตัวปฏิบัติการอื่นๆได้ เช่น

  SJMP $+5 หรือ SJMP $-5
- ผู้ใช้สามารถกำหนดตำแหน่งของ SOURCE PROGRAM และ ตำแหน่งของ OBJECT CODE ได้โดยตรง โดยใช้ ORG และ LOC เช่น

  ORG 1000H LOC 9000H

  ASMS ไม่อนุญาตให้กำหนด LOC ที่ 0000-200H
- ถ้าผู้ใช้ใส่เครื่องหมาย = หลังคำสั่ง ASMS หมายถึงให้มี LIST ออกทาง SOLFTWATE SERIAL PORT (พอร์ท 1 ขา 7) ด้วย

การควบคุม ASMS

- พิมพ์ ^A เป็นการเพิ่มค่าแอดเดรสขึ้นอีกหนึ่งทุกครั้งที่กด ^A (ADVANCE)
- พิมพ์ ^B เป็นการลดค่าแอดเดรสลงหนึ่งค่าทุกครั้งที่กด ^B

ทั้งสองคำสั่งใช้ในการแก้ไขโปรแกรมแอสแซมบลี้ที่กำลังเขียนอยู่ โดยสามารถเลื่อนตำแหน่งของแอดเดรสไปอยู่ตรงใดก็ได้ แต่การแก้ไขจะเป็นการเขียนทับไม่มีการเลื่อนตัวโปรแกรมที่เขียนในบรรทัดที่อยู่ถัดไปได้

การออกจากคำสั่ง ASMS กระทำได้ 2 วิธีคือ

1. พิมพ์คำว่า END
2. กด ^C (CTRL-C)

ตัวอย่างการใช้ ASMS

```
>ASMS
เครื่องแปลให้                ผู้ใช้นิยม
9000                         ORG 9000H LOC 9000H
9000                         TXSTRING  EQU  499BH
9000  78 05                  MOV  R0,#5
9002  12 49 9B               LOOP:  LCALL  TXSTRING
9005  54 45 53 54            DB   'TEST...! '
      2E 2E 2E 21
      20
900E  00                     DB   00
900F  D8 F1                  DJNZ  R0,LOOP
9011  E4                    CLR  A
9012  02 00 30               LJMP  30H   ;Goto command mode
9015  END
READY

>ARUN 9000H

TEST...! TEST...! TEST...! TEST...! TEST...!

READY
>
```

2. EDIT [LINE NUMBER]

MODE : COMMAND

วัตถุประสงค์ : แก้ไขโปรแกรมภาษาเบสิคในบรรทัดที่ต้องการจะแก้ไข

รูปแบบการใช้ : EDIT [LINE NUMBER]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตัวอย่าง : EDIT 10 <CR>

ภายหลังการกด <CR> CP32-BASIC V2.0 จะแสดงโปรแกรมภาษาเบสิค บรรทัดที่กำหนดด้วยตัวเลขหลังคำสั่ง EDIT ในคำสั่ง EDIT ยังมีคำสั่งย่อย (SUB COMMAND) ดังนี้ :-

SPACE BAR เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางขวา

SPACE BACK เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางซ้ายโดยลบข้อมูลบนจอ แต่จะไปลบข้อมูลในบัฟเฟอร์ของ CP32-BASIC

^A เป็นการเพิ่มเติมคำสั่งหรือ STRING เข้าไปในบรรทัดนั้นเริ่มที่ตำแหน่งของเคอร์เซอร์ปัจจุบัน โดยที่อักขระใดๆก็ตามที่ถูกพิมพ์ภายหลังการกด ^A จะถูกเพิ่มเติมเข้าไป และจะดันข้อมูลหลังเคอร์เซอร์ออกไป(เหมือน INSERT MODE ของเวิร์ดโปรเซส ทั่วๆไป)
การออกจากคำสั่ง ^A กระทำได้โดยการกด ^A อีกครั้ง

ข้อสังเกต เมื่อกด ^A ครั้งแรกจะทำให้ข้อความหลังเคอร์เซอร์ทั้งหมดหายไปจากจอแต่ไม่ได้ถูกลบออกจากบัฟเฟอร์ของ CP32-BASIC V2.0 และเมื่อกด ^A อีกครั้งเราสามารถเห็นข้อความเดิมได้โดยการกด SPACE BAR เลื่อนตำแหน่งของเคอร์เซอร์ไปทางขวา จะปรากฏข้อความที่หายไปทีละตัวจนจบบรรทัด ในกรณีที่เลื่อนเคอร์เซอร์มาถึงอักขระตัวสุดท้ายของบรรทัดแล้ว ถ้าผู้ใช้กด SPACE BAR อีกเครื่องจะส่งเสียงเตือน (BEEP)

^D ลบอักขระ ในตำแหน่งของเคอร์เซอร์ และทุกครั้งที่กด ^D จะลบอักขระในตำแหน่งถัดไปโดยที่อักขระที่เหลืออยู่จะเลื่อนขึ้นมาแทนที่ และเมื่อลบอักขระจนถึงจบบรรทัดเครื่องก็จะส่งเสียงเตือน (BEEP)

^Q ออกจากโหมด EDIT โดย SAVE การแก้ไขต่างๆในบรรทัดนั้นลงในโปรแกรมภาษาเบสิค (UPDATE)

^C ออกจากโหมด EDIT โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขข้อความเดิม

หมายเหตุ การใช้คำสั่งย่อยอาจใช้คำสั่งย่อยมากกว่า 1 คำสั่ง และมากกว่า 1 ครั้งในการใช้ EDIT เช่น อาจใช้ ^A และหรือ ^D ตรงส่วนใดในบรรทัดก็ได้จนกว่าจะได้ข้อความตามต้องการแล้วจึงกด ^Q

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการแก้ไขแบบพิมพ์ทับ (OVER WRITE) กระทำได้โดยเลื่อนเคอร์เซอร์มายังตำแหน่งที่ต้องการจะแก้ไข และพิมพ์ข้อความที่ต้องการจะพิมพ์ทับข้อความเดิมได้ แต่อย่าลืมว่าเมื่อต้องการให้มีการแก้ไขข้อมูลในบรรทัดนั้นต้องออกจาก EDIT โดยการกด ^Q

3 RENUM(ber)

MODE : COMMAND

วัตถุประสงค์ : กำหนดหมายเลขบรรทัดใหม่เพราะในการเขียนโปรแกรมต้องมีการสอดแทรกบรรทัดระหว่างบรรทัดของโปรแกรมเดิม ซึ่งในบางครั้งถ้ามีการเพิ่มเติมบรรทัดขึ้นในระหว่างบรรทัดเดิมมากๆ อาจจะทำให้ไม่มีหมายเลขบรรทัดในการที่จะสอดแทรก เช่น ระหว่างบรรทัดที่ 5 - 10 ผู้ใช้สามารถเพิ่มเติมได้อีก 4 บรรทัด (6 - 9) เท่านั้น

รูปแบบของคำสั่ง :

RENUM : จะทำการเปลี่ยนหมายเลขบรรทัดทุกบรรทัดในโปรแกรมภาษาเบสิค โดยจะกำหนดให้หมายเลขบรรทัดแรกคือ 10 และมีค่าการเพิ่มระหว่างบรรทัดเท่ากับ 10

RENUM [INTEGER] : จะทำการเปลี่ยนหมายเลขบรรทัดตลอดโปรแกรม โดยมีหมายเลขบรรทัดเริ่มต้น คือ 10 และมีค่าการเพิ่มขึ้นระหว่างบรรทัดเท่ากับตัวเลขที่กำหนดหลังคำสั่ง RENUM

RENUM [INTEGER] , [INTEGER]
: จะทำการเปลี่ยนหมายเลขบรรทัดตลอดโปรแกรม โดยที่หมายเลขบรรทัดเริ่มต้นด้วยค่าของ INTEGER ตัวแรกและมีค่าการเพิ่มระหว่างบรรทัดเท่ากับ INTEGER ตัวที่สอง

RENUM [INTEGER] , [INTEGER] , [INTEGER]
: จะทำการเปลี่ยนหมายเลขบรรทัดตั้งแต่บรรทัดที่ถูกกำหนดด้วย INTEGER ตัวที่ 2 และบรรทัดที่จะเปลี่ยนจะต้องเปลี่ยนเป็นบรรทัดที่กำหนดโดย INTEGER ตัวที่หนึ่ง และมีการเพิ่มระหว่างบรรทัดถูกกำหนดโดย INTEGER ตัวสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ข้อควรระวัง หมายเลขบรรทัดใหม่ (ตัวที่หนึ่ง) จะต้องมีค่ามากกว่าบรรทัดเริ่มต้นที่จะทำการเปลี่ยน (ตัวที่สอง)

4. VERIFY / VERIFYC

MODE : COMMAND / RUN

วัตถุประสงค์ : ใช้เปรียบเทียบค่าในหน่วยความจำ 2 ช่วง โดยที่หน่วยความจำช่วงแรกถูกกำหนดโดยตัวเลขที่ตามหลังคำสั่ง VERIFY ซึ่งที่ตัวเลขตัวแรกกำหนดแอดเดรสเริ่มต้นของหน่วยความจำ และตัวเลขตัวที่ 2 กำหนดแอดเดรสสุดท้ายของหน่วยความจำในช่วงที่ 1 และตัวเลขตัวที่ 3 กำหนดแอดเดรสเริ่มต้นของหน่วยความจำในช่วงที่ 2
ส่วนคำสั่ง VERIFYC ใช้เปรียบเทียบหน่วยความจำที่เป็นข้อมูล (DATA MEMORY) กับหน่วยความจำโปรแกรม (CODE MEMORY)

ตัวอย่าง VERIFY
VERIFY 1000H , 1FFH , 8000H
เป็นการเปรียบเทียบค่าในหน่วยความจำ RAM ตั้งแต่ 1000 -1FFFH กับหน่วยความจำตำแหน่ง 8000H

ตัวอย่าง VERIFYC
VERIFYC 1000H , 1FFFH , 1000H
เป็นการเปรียบเทียบค่าในหน่วยความจำโปรแกรมในตำแหน่ง 1000H - 1FFFH (ROM) กับหน่วยความจำข้อมูลในตำแหน่ง 1000H (RAM)

** เมื่อใช้คำสั่ง VERIFY หรือ VERIFYC ถ้าปรากฏว่ามีข้อมูลในตำแหน่งใดไปตรงกัน CP32-BASIC V2.0 จะแสดงแอดเดรสและข้อมูลของหน่วยความจำทั้งช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 **

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตัวอย่าง

```
> VERIFY 1000H,1200H,8000

  1000  00H      8000H  6FH
  1001  00H      8001H  07H

  READY
>
```

5 ASM / ASM#

MODE : COMMAND

วัตถุประสงค์ : ใช้แปลภาษาแอสแซมบลี้เป็นภาษาเครื่องโดยใช้ร่วมกับคำสั่ง TEDIT (TEXT EDITOR) คำสั่ง ASM นี้ใช้สำหรับแปลโปรแกรมที่ไม่ใหญ่มากนัก ซึ่งกระทำบนหน่วยความจำและให้ MACHINE CODE บนหน่วยความจำของบอร์ด CP32 จึงเหมาะสำหรับการพัฒนาโปรแกรมเช่นการทดสอบ ROUTINE สั้นๆที่จะทำงานร่วมกับภาษาเบสิค ซึ่ง CODE ที่แปลเรียบร้อยแล้วถ้ากำหนดให้อยู่ที่ตำแหน่ง 8000H – 0DFFFH จะสามารถ RUN ได้โดยตรงโดยใช้คำสั่ง ARUN หรือถ้าถูกกำหนดให้ CODE ที่แปลได้ไปอยู่ที่หน่วยความจำข้อมูล (RAM) ก็สามารถโปรแกรมลง EPROM ได้โดยใช้คำสั่ง EPROG (ถ้าใช้ CPU เบอร์ 8052 AH BASIC) ภาษาแอสแซมบลี้ที่จะใช้กับคำสั่ง ASM นี้ให้ใช้นีโมนิคส์มาตรฐานที่ INTEL กำหนดไว้สำหรับ CPU ในตระกูล MCS51 MICRO-CONTROLLER นอกจากนั้นชื่อของ SPECIAL FUNCTION (SFR'S) ยังสามารถใช้ได้ตามที่กำหนดไว้ในตัว CPU ในตระกูล MCS51

ลักษณะพิเศษของตัวแอสแซมเบลอร์นี้ คือทำการแปล 2 ครั้ง (TWO PASS) ซึ่งทำให้ผู้ใช้สามารถกำหนด LABEL ซึ่งจะใช้เป็นจุดอ้างอิง ในการกระโดด (BRANCH) ซึ่งทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้สามารถกระโดดไปข้างหน้าและกระโดดถอยหลังได้
นอกจากนี้ผู้ใช้ยังสามารถกำหนดได้ว่าจะให้ CODE ที่แปลแล้วไปเก็บไว้ตำแหน่งใด โดยใช้คำสั่งเทียม ดังนี้ :-

ORG (ORIGIN)

ORG เป็นคำสั่งที่ไม่มีรหัสโค๊ดในภาษาเครื่อง แต่จะเป็นตัวบอกตัวแอสแซมเบลอร์ว่าโปรแกรมภาษาแอสแซมบลี้นี้จะเริ่มต้นที่แอดเดรสใด

ตัวอย่าง

ORG 1000H

** ถ้าไม่ได้มีการกำหนด ORG ของโปรแกรม โค๊ดจะเริ่มต้นที่แอดเดรส 0000H **

LOC (LOCATION)

LOC เป็นคำสั่งเทียมที่บอกตัวแอสแซมเบลอร์ว่าจะให้นำโค๊ดที่แปลได้ไปเก็บไว้ที่ใด ถ้ามิได้กำหนด LOC ตัวแอสแซมเบลอร์จะแปลภาษาแอสแซมบลี้และนำไปเก็บต่อท้าย SOURCE PROGRAM ซึ่ง SOURCE PROGRAM ที่ผู้ใช้เขียนขึ้นจะอยู่ใน RAM ตำแหน่ง 210H เป็นต้นไป คำสั่ง LOC นี้ไม่สามารถใช้ได้โดยอิสระต้องใช้ตามหลังคำสั่ง ORG และต้องอยู่ในบรรทัดเดียวกันกับคำสั่ง ORG

CP32-BASIC สงวนเนื้อที่บนแรมในตำแหน่ง 0 – 512 ไว้ จึงไม่ควรกำหนด LOC ไว้ที่ตำแหน่ง 0000

ตัวอย่าง

ORG 0000 LOC 1000H

คำแนะนำ ควรกำหนดตำแหน่ง LOC ให้มากกว่าตำแหน่งสุดท้ายของตัวโปรแกรมภาษาแอสแซมบลี้เพราะในขณะที่ตัวแอสแซมเบลอร์ทำการแปลภาษาแอสแซมบลี้ นั้นจะนำโค๊ดที่แปลได้ไปใส่ลงหน่วยความจำในตำแหน่งที่กำหนดด้วย LOC ทันที และอาจทับส่วนที่เป็น SOURCE PROGRAM ทำให้โปรแกรมเสียไปซึ่งมีผลทำให้การแปลผิดพลาดและล้มเหลว

นอกจากนั้นการใช้คำสั่งเทียม DB (DEFINE BYTE) ยังสามารถใช้กำหนดรหัส ASCII ซึ่งเป็นข้อความได้ด้วย

ตัวอย่าง

DB 'THIS IS SOME TEXT'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

การใช้ #HIGH

#LOW

ในการเขียนโปรแกรมภาษาแอสแซมบลี้บางครั้งที่เราต้องการกำหนดค่าเพียงไบท์สูงหรือไบท์ต่ำของตำแหน่งที่อ้างด้วย LABLE ให้กับรีจิสเตอร์ ซึ่งในการแอสแซมบลี้ของคำสั่ง ASM สามารถใช้ได้โดยมีรูปแบบดังนี้ :-

```
MOV  A , #HIGH  1234H
MOV  A , # LOW  1234
        หรือ
MOV  A, # HIGH  LABEL
```

ซึ่งคำสั่งเหล่านี้ไม่มีในภาษาแอสแซมบลี้แต่เป็นคำสั่งชนิด DIRECTIVE ASSEMBLY

การ ADDRESSING แบบบิท

ตัวแอสแซมเบลอร์อนุญาตให้ใช้จุด (".") ในการอ้างถึงแอดเดรสของข้อมูลแบบบิทเดียว เช่น

CLR ACC.6 หมายถึงการเคลียร์บิทที่ 6 ของรีจิสเตอร์ A และยังสามารถใช้ร่วมกับ EQU ได้ เช่น

```
MY-BIT    EQU    ACC.1
```

เมื่อมีการอ้างถึง MY-BIT จะหมายถึงการกระทำต่อรีจิสเตอร์ A บิทที่ 1

หมายเหตุ การตั้งชื่อ LABEL จะมีความยาวได้ไม่เกิน 128 ไบท์ และทุกตัวมีความสำคัญแต่การตั้งชื่อยาวทำให้สิ้นเปลืองหน่วยความจำและเวลา การตั้งชื่อกำหนดให้ขึ้นต้นด้วยตัวอักขระ (A - Z) และในชื่อของลาเบลอาจประกอบด้วยตัวเลขหรือเครื่องหมายขีดล่าง " - " (UNDER LINE)

ASM# นอกจากการแสดง LISTING ของการ ASSEMBLY ทางจอภาพแล้วยังให้ผลอันเดียวกันทาง SOLFWARE SERIAL PORT (ดูคำสั่ง ASMS#)

** ทุกครั้งที่มีการติดต่อกับ Solfware serial port ควรกำหนด BAUD ด้วย **

ERROR MESSEGE

ข้อความแสดงความผิดพลาดในการเขียนโปรแกรมภาษาแอสแซมบลี้ส่วนใหญ่จะมีความหมายในตัวเองอยู่แล้วดังจะได้แสดงต่อไปนี้ :-

: COMMA EXPECTED
ไม่มีเครื่องหมาย COMMA (,) เช่น MOV A 123

: EIGHT BIT VALUE EXPECTED.
การพยายามกำหนดข้อมูลขนาด 16 บิท ให้กับรีจิสเตอร์ 8 บิท เช่น
MOV A , # 1000H

: SYNTAX ERROR
เป็นการผิดพลาดที่เกิดจากการที่ผู้ใช้ พิมพ์ผิด

: NUMERIC VALUE EXPECTED
ปกติหมายถึง มีส่วนที่ต้องกำหนดด้วยเลขจำนวน แต่ผู้ใช้อาจจะกำหนดเป็นอย่างอื่น เช่น DB MOV

: DESTINATION OUT OF RANG
ในการ JUMP หรือ CALL ที่เกินกว่าขอบเขต เช่น คำสั่ง AJMP หรือ ACALL หรือการ JUMP เกินค่า RELATIVE

: MEMORY NOT ACCEPTING OBJECT CODE
กำหนด LOC ในตำแหน่งที่ไม่สามารถเขียนข้อมูลของ OBJECT CODE ลงไปได้

: BIT ADDRESSING ERROR
พยายามที่จะอ้างถึงแอดเดรสแบบบิทที่ไม่สามารถอ้างถึงได้ เช่น
SETB ACC.9 หรือ CLR DPH.5

: LABEL ALREADY IN SYMBOL TABLE
กำหนดชื่อของ LABEL ซ้ำกัน

: LABEL NOT DEFINED
พยายามที่จะใช้ LABEL ที่ไม่เคยกำหนดค่าหรือไม่เคยกำหนดเป็น LABEL

: OUT OF MEMORY
หน่วยความจำไม่เพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6 TEDIT (Text Editor)

MODE : COMMAND

วัตถุประสงค์ : เป็นการเรียกโปรแกรม EDITOR แบบง่ายๆ ที่มีอยู่ใน CP32-BASIC V2.0 EDITOR ตัวนี้ใช้ในการเขียนโปรแกรมภาษา ASSEMBLY และมีลักษณะการใช้งานอยู่ 3 แบบคือ

1. COMMAND MODE
2. INSERT MODE
3. EDIT MODE

เมื่อใช้คำสั่ง TEDIT <CR> จะปรากฏข้อความดังในรูปข้างล่าง

```
TEXT EDITOR , SOURCE - P = PROM ;  N = NEW FILE
ENTER  P , OR  N  -
```

เมื่อผู้ใช้ต้องการสร้าง FILE ใหม่ให้กด N <CR>, EDITOR จะแสดง PROMPT ดังนี้

```
(1 , 528 , 528) *
```

ตัวเลขตัวที่ 1 หมายถึง หมายเลขบรรทัด (LINE NUMBER)
ตัวเลขตัวที่ 2 หมายถึง ตำแหน่งสุดท้ายของโปรแกรม +1
ตัวเลขตัวที่ 3 หมายถึง ตำแหน่งเริ่มต้นของบรรทัดในขณะนั้น

ในกรณีที่ยังไม่มีโปรแกรมเลย PROMPT จะแสดงดังในตัวอย่างข้างบน การเขียนโปรแกรมด้วย TEDIT ผู้ใช้ต้องตรวจสอบเองว่าโปรแกรมไม่ยาวเกินหน่วยความจำที่มีอยู่ ตัว EDITOR จะไม่ตรวจสอบให้

PROMPT ที่มีตัวเลข 3 จำนวน หมายถึง อยู่ใน COMMAND MODE โดยที่คำสั่งใน COMMAND MODE ที่จะใช้ตัวอักษรเดียวเป็นคำสั่งดังจะได้แสดงต่อไปนี้

คำสั่งย่อย D(lete) = ลบโปรแกรมในบรรทัดที่แสดงด้วยจำนวนเลขตัวแรกของ PROMPT
คำสั่งย่อย E(dit) = เข้าสู่โหมดการแก้ไขในบรรทัดที่แสดงอยู่ในขณะนี้ (ดูที่ PROMPT) ภายในคำสั่ง E ยังมีคำสั่งย่อย (SUB COMMAND) อีกดังนี้

SPACE BAR - เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางขวา 1 อักษร
SPACE BACK - เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางซ้าย 1 อักษร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Control-A (^A) หมายถึง อนุญาตให้ผู้ใช้เพิ่มเติม (ADD) ข้อความเข้าไปในบรรทัดนั้นโดยเริ่มตั้งแต่ตำแหน่งของเคอร์เซอร์ในขณะนั้น เมื่อกด ^A ข้อความตั้งแต่เคอร์เซอร์ไปจนจบบรรทัดจะหายไป ต่อไปผู้ใช้สามารถพิมพ์ข้อความเพิ่มเติมเข้าไปได้ตามต้องการ TEDIT จะทำการเลื่อนข้อมูลที่อยู่ที่ตำแหน่งของเคอร์เซอร์ก่อนกด ^A ไปเรื่อยๆเท่ากับจำนวนอักษรที่ผู้ใช้พิมพ์เพิ่มเติมเข้าไป การออกจากคำสั่งการเพิ่มเติม(^A) กระทำได้โดยกด ^A อีกครั้ง

Control-D (^D) หมายถึง ลบตัวอักขระในตำแหน่งที่เคอร์เซอร์อยู่ในขณะนั้น

Control-Q (^Q) หมายถึง ออกจากคำสั่ง EDIT และเก็บข้อความที่แก้ไขกลับเข้าไปใน TEXT FILE นั้น

Control-C (^C) หมายถึง การออกจากคำสั่ง EDIT โดยไม่มีการแก้ไขข้อความใดในบรรทัดนั้น

การพิมพ์อักขระใดๆในคำสั่ง EDIT โดยมิได้กด ^A หมายถึงการพิมพ์ทับ(OVER-WRITE) ข้อความเดิม

คำสั่งย่อย F(ind)

F [ASCII CHARACTER STRING] เป็นคำสั่งค้นหาสตริงที่กำหนดหลังคำสั่งF โดยพิมพ์ข้อความที่ต้องการค้นหาติดกับตัว F ไม่ต้องเว้นวรรค เมื่อพบข้อความที่ต้องการค้นหาเครื่องจะแสดงบรรทัดที่พบ ในกรณีที่ต้องการค้นหาคำเดิมในตำแหน่งอื่นๆ อีกต้องเลื่อนบรรทัดไปข้างหน้า (ดู คำสั่ง L) มิฉะนั้นโปรแกรมจะค้นพบที่เดิมอีก

คำสั่งย่อย I(sert)

ถ้าเป็นการใช้ในการสร้าง FILE ใหม่ (ใช้ตามหลังคำสั่ง N) จะเป็นการเขียนโปรแกรมตามปกติ ผู้ใช้สามารถพิมพ์คำสั่งภาษาแอสแซมบลี้ได้ทันทีหลังจากกด <CR> EDITOR จะเพิ่มบรรทัดให้โดยอัตโนมัติ

แต่กรณีที่เรียกใช้ TEDIT โดยที่มี FILE อยู่แล้ว คำสั่ง I จะเป็นการสอดแทรกหรือเพิ่มเติมบรรทัดโดยจะดันส่วนของโปรแกรมที่อยู่ในบรรทัดที่ผู้ใช้สั่ง I(nsert) ไปเรื่อยๆ การจะออกจากคำสั่ง I มีทางเดียวคือกด ^C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

คำสั่งย่อย L(ine)

เป็นการกำหนดบรรทัดให้กับตัวชี้ (POINTER) ถ้าไม่กำหนดเลขบรรทัดตามหลังคำสั่ง L โปรแกรมจะชี้บรรทัดที่ 1

ตัวอย่าง

```
(9 , 727 , 605) * LZ
(2 , 727 , 540) * L
(1 , 727 , 528) *
```

คำสั่งย่อย T [integer]

ใช้ในการแสดงโปรแกรมภาษาแอสแซมบลี้ที่อยู่ TEXT EDITOR ออกทางจอ MONITOR เลขจำนวนที่ตามหลังคำสั่ง T จะเป็นตัวบอกว่าจะให้แสดงผลเป็นจำนวนกี่บรรทัดนับจากบรรทัดที่อยู่ปัจจุบัน (ดูจาก PROMPT) ถ้าไม่ได้กำหนดจำนวนบรรทัดโปรแกรมจะแสดงบรรทัดปัจจุบันเพียงบรรทัดเดียว

ใช้เครื่องหมาย # ตามหลังคำสั่ง T จะเป็นการพิมพ์ FILE ออกทาง SOLFTWARE SERIAL PORT (P1.7) เพียงอย่างเดียว ในกรณีนี้จะไม่มีหมายเลขบรรทัดออกทาง SOLFTWARE SERIAL PORT

ตัวอย่าง

```
(1 , 727 , 528) * T3
(1) * THIS  IS  LINE  1
(2) * THIS  IS  LINE  2
(3) * THIS  IS  LINE  3
```

ตัวอย่าง พิมพ์โปรแกรมออกทาง SOLFTWARE SERIAL PORT ในกรณีที่ต้องการพิมพ์โปรแกรมส่งให้ SERIAL PORT PRINTER

```
(1 , 727 , 528) * T # 3
THIS  IS  LINE  1
THIS  IS  LINE  2
THIS  IS  LINE  3
```

** (ดูคำสั่ง BAUD ด้วย) **

** สำหรับผู้ที่ต้องการ FILE ทาง PARARELL PRINTER ให้ดูคำสั่ง UPLASM **

คำสั่งย่อย P(rogram) ** (ใช้ได้กับ CPU 8052AH BASIC) **

เป็นคำสั่ง SAVE โปรแกรมภาษาแอสแซมบลี้ที่เขียนลงใน EPROM แต่ในกรณีนี้บนบอร์ด CP32 ต้องมี CPU เบอร์ 8052 AH BASIC V1.1 และต้องใช้เป็น INTERNAL PROGRAM โดยต้องถอด J1 บนบอร์ด CP32 ออก

หลังจากใช้คำสั่ง P โปรแกรมจะ ถามว่าพร้อมที่จะ SAVE หรือยัง :-

SAVE THE TEXT IN PROM ARE YOU READY (Y/N) ?

เมื่อผู้ใช้พร้อมที่จะทำการ SAVEY ให้พิมพ์ (Y) สำหรับการโปรแกรมเป็นธรรมดา และ (YI) สำหรับโปรแกรมแบบ INTELLIGENT ในการใช้คำสั่ง p นี้

คำแนะนำ ก่อนจะทำการเขียนลง EPROM ให้ทำการเตรียมการโปรแกรม EPROM ให้พร้อมโดยมีขั้นตอนดังนี้ :-

1. ใส่ EPROM ลงใน SOCKET ตัวขวาสุด
2. เซท DIP SWITCH ให้ถูกต้องตามเบอร์ของ EPROM
3. SW. 3 เลื่อนไปทางตำแหน่ง ON (ด้านบน)
4. เตรียมไฟ VPP
5. ที่ DIP SW จุดที่ 8 ให้เลื่อนไปที่ตำแหน่ง BURN (LED สีเขียวจะดิด)

สำหรับผู้ที่ไม่ต้องการเขียนลง EPROM ก็อาจให้ 8K RAM PACK PLUS เสียบแทน EPROM ได้ แต่ ** ต้องไม่ใส่ไฟ VPP **

ส่วนกรณีที่ต้องการเก็บ FILE ไว้ในหน่วยความจำสำรอง (DISK) ให้ดูคำสั่ง UPLASM (UP LOAD ASM. PROGRAM) และสำหรับทางเลือกของผู้ที่ไม่ได้ใช้ 8052 AH BASIC แต่ต้องการเก็บ TEXT FILE ไว้ในส่วน RAM ที่ BACKUP (มี BATTERY BACKUP) ให้ DUMP MEMORY ที่ตำแหน่ง 210H (ดูคำสั่ง DUMP)— และตรวจสอบดูว่า TEXT ไฟล์ไปสิ้นสุด (00H) ที่ตำแหน่งใด เมื่อพบแล้วใช้คำสั่ง MOVE จาก 210– จบไฟล์ ไปไว้ที่ 800B

MOVE 210H , XXXX , 800BH

และที่ 8008H ใส่ 0F0H (ดูคำสั่ง ENTER)

ที่ 8009H - 800AH ใส่ความยาวของ TEXT ไฟล์ โดยไบท์สูงอยู่ที่ 8009H

หมายเหตุ ในกรณีที่ยังไม่ได้เขียนโปรแกรมภาษาเลย การใช้คำสั่ง P จะเป็นการโหลดโปรแกรมแอสแซมบลี้จากหน่วยความจำ 800Bh มาที่ RAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสั่งย่อย Q(uite)

ใช้สำหรับออกจากคำสั่ง TEDIT กลับสู่ COMMAND MODE ของ CP32-BASIC

คำสั่งย่อย Z

เซทตัวชี้ (POINTER) ให้ชี้ไปที่บรรทัดสุดท้ายของ TEXT ไฟล์

ตัวอย่าง

```
(1 , 727 , 528) * Z
(22 , 727 ,727) *
```

7 UPLASM : UP LOAD ASM.

MODE : COMMAND

วัตถุประสงค์ : ส่งไฟล์ ASM ที่เขียนด้วย TEDIT ขึ้นสู่ PC เพื่อเก็บไฟล์ไว้ใช้ในครั้งต่อไป หรือ ใช้ในการตรวจดูโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ที่เขียนไว้โดยการแสดงบนจอและสามารถหยุดดูได้

รูปแบบคำสั่ง

```
UPLASM <CR>
UPLASM "File name"
```

ตัวอย่าง การแสดงตัวโปรแกรมแอสเซมบลี้

```
> UPLASM <CR>
```

หลังจากกด <CR> โปรแกรมจะถูก list ขึ้นบนจอ

ตัวอย่าง การเก็บไฟล์ลง DISK

```
> UPLASM "Myprog.asm" <CR>
```

การตั้งชื่อไฟล์ให้ใช้กฎการตั้งชื่อใน DOS คำสั่งนี้ไม่สามารถกำหนด PATH ได้ การเก็บจะเก็บลง DISK DRIVE ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

หมายเหตุ ** กรณีที่ผู้ใช้ทำการ UP LOAD ไฟล์ไปทับไฟล์ที่มีอยู่แล้ว ไฟล์ใหม่นี้จะไปต่อท้ายไฟล์เดิมโดยไม่ลบไฟล์เดิม **

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

8 DLASM (Down load ASM.program)

MODE : COMMAND

วัตถุประสงค์ : โหลดโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้จาก DISK DRIVE ลงสู่หน่วยความจำ

รูปแบบคำสั่ง :

DLASM "File name"

ตัวอย่าง

>DLASM "Myprog.asm" <cr>

หลังจากกด <CR> ไฟล์จะถูกอ่านและส่งมาให้ CP32 จนจบ และจะเข้าสู่คำสั่ง TEDIT โดยอัตโนมัติ ต่อจากนั้นผู้ใช้สามารถใช้คำสั่งต่างๆของ TEDIT ได้ทันที

** แต่ในกรณีที่ไม่พบไฟล์ที่กำหนด โปรแกรมจะไม่บอกแต่จะเข้าสู่คำสั่ง TEDIT ผู้ใช้สามารถใช้คำสั่งของ TEDIT ได้ทันที (คูการใช้ TEDIT) **

9 LOADX

MODE : COMMAND

วัตถุประสงค์ โหลด BASIC โปล์ จาก DISK DRIVE โดยตรง

รูปแบบคำสั่ง

LOADX "File name"

ตัวอย่าง

>LOADX "Bshow.bas"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสั่งที่ปรับปรุงจาก V1.0

นอกจาก BASIC32 V2.0 จะมีคำสั่งเพิ่มเติมขึ้นอีกหลายคำสั่งแล้ว ยังได้ทำการปรับปรุงคำสั่งบางคำสั่งที่มีอยู่ใน V1.0 ดังนี้

DLOAD (Down load ปรับปรุงจาก Version 1.0)

MODE : COMMAND/RUN

วัตถุประสงค์ : คำสั่ง DLOAD ได้มีการแก้ไขปรับปรุงจาก V1.0 คือ ผู้ใช้สามารถใส่ชื่อ (FILENAME) ตามหลังคำสั่ง DLOAD ได้ทันที ดังตัวอย่าง

DLOAD " FILENAME "

จากตัวอย่างข้างบนหมายความว่า ทำการ LOAD HEX ไฟล์จาก DISK DRIVE ลงในหน่วยความจำตามตำแหน่งของ ORIGIN ของโปรแกรม การใช้คำสั่งในลักษณะนี้ใน VERSION 2.0 CP32 จะทำการส่ง FILE จาก DISK DRIVE ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน การใช้คำสั่ง DLOAD นี้ผู้ใช้ไม่สามารถกำหนด PATH ได้ นั่นหมายความว่า ถ้าผู้ใช้ต้องการ LOAD FILE ที่อยู่คนละ DIRECTORY ผู้ใช้มีทางเลือกได้ 2 ประการคือ ใช้คำสั่ง DLOAD ในลักษณะที่ใช้ใน V1.0 หรือประการที่ 2 เปลี่ยน PATH โดยการกด ALT-F7 และกำหนด DRIVE ใหม่ ต่อจากนั้นจึงใช้คำสั่ง DLOAD "File name" ได้

** การใช้ DLOAD ทั้ง 2 ลักษณะ คือ ใช้แบบเก่า (V1.0) หรือแบบใหม่ (V2.0) ผู้ใช้สามารถใส่ค่า OFFSET ได้ทั้ง 2 ลักษณะ **

ตัวอย่าง

```
DLOAD  1000H
DLOAD  " FILENAME "  1000H
```

หมายเหตุ ** กรณีที่โปรดอมหาไฟล์ที่กำหนดให้ไม่พบ CP32 BASIC อาจติดอยู่ในโหมดของ DLOAD ให้ผู้ใช้กดคีย์ใดก็ได้ 5 ครั้ง โปรแกรมจะกลับมาที่ command mode ตามปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

UPLOAD (ปรับปรุงจาก VERSION 1.0)

MODE : COMMAND/RUN

วัตถุประสงค์ : ส่งไฟล์ในรูปของ INTELL HEX FORMAT จาก CP32 ไปที่เครื่อง PC

รูปแบบคำสั่ง

UPLOAD "File name" <start addr.>,<final addr.>

ตัวอย่าง

UPLOAD "Prog1.hex" 8000h,8100h

หมายเหตุ ** ในกรณีที่ผู้ใช้ทำการ UPLOAD ทับแฟ้มไฟล์ที่มีอยู่แล้ว ข้อมูลที่ทำการส่งขึ้นไปจะไปต่อท้ายไฟล์ที่มีอยู่เดิม โดยไม่ลบไฟล์เก่า **

DIR (ปรับปรุงจาก VERSION 1.0)

MODE : COMMAND

วัตถุประสงค์ : Directory จาก Disk drive ของเครื่อง PC โดยสามารถใช้ Wide card ที่เคยใช้ใน DOS ได้ เช่น *.* , ????.* แต่ไม่อนุญาตให้ใช้ '/' หรือ PATCH

รูปแบบคำสั่ง :

DIR " หมายถึง Directory ทุกไฟล์ (เหมือน DIR *.*)

DIR "Wide card" เช่น DIR "*.ASM" หมายถึงขอดูไฟล์ที่มีนามสกุล ASM ทุกไฟล์

คำแนะนำ ในการใช้คำสั่ง DIR พารามิเตอร์ที่ใช้ต้องอยู่ในเครื่องหมายคำพูดเสมอ และไฟล์ที่หาไม่พบจะไม่แสดงคำว่า "File not found" แต่จะกลับมาที่ Comand mode ทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งาน CP32 ร่วมกับ PROCOMM PLUS

เนื่องจากโปรแกรมสำเร็จรูป PROCOMM PLUS เป็นโปรแกรมขนาดใหญ่มีขีดความสามารถสูงพอสมควรจึงไม่สามารถนำรายละเอียดของ PROCOMM มากล่าวในที่นี้ได้ แต่จะขอกล่าวไว้พอสังเขปดังนี้ :-

1. การส่ง FILE จากเครื่อง PC ไปยัง CP32
   - กดคีย์ PgUp โปรดอมจะแสดง MENU ให้เลือก PROTOCOL ซึ่งมีให้เลือก 16 รายการ ให้ผู้ใช้เลือกการส่ง FILE แบบ ASCII (เลือกเลข 4) และกด ENTER
   - กำหนดชื่อไฟล์ที่จะส่งพร้อมนามสกุล (ถ้ามี) กด ENTER

   PROCOMM จะทำการส่ง FILE ที่กำหนดมายัง CP32 ความเร็วในการส่งขึ้นอยู่กับการเซทค่า CHARACTER PACING และค่า LINE PACING (ดูรายละเอียดในการเซทค่า)

2. การรับ FILE จาก CP32 เก็บลง DISK DRIVE
   - กดคีย์ PgDn โปรดอมจะแสดง MENU ให้เลือกเหมือนข้อ 1
   - กำหนดชื่อที่จะนำไฟล์ไปเก็บไว้
   - ในกรณีที่เลือกโปรโตคอลในการรับไฟล์แบบ ADCII นั้นทุกอย่างที่ถูกส่งผ่านทาง RS232 จะถูกเขียนลงไฟล์ที่กำหนดชื่อไว้
   - การจบไฟล์หรือการออกจากโหมดการรับไฟล์กระทำได้โดยการกด ESC

3. การตั้งค่า PARAMETER บางตัวที่สำคัญกับการใช้งานร่วมกับ CP32-BASIC

   3.1 CHARACTER PACING และ LINE PACING

   ในกรณีที่เลือกการส่ง FILE แบบ ASCII นั้นจะไม่มีการตรวจสอบ (HAND CHEK) มากนัก จะมีก็แต่เพียง XON/XOFF ฉะนั้นจึงต้องมีการยืดเวลาเพื่อให้ฝ่ายรับรับข้อมูลที่ส่งไปและทำการ PROCESS ได้ทัน ในกรณีของ CP32 ที่เห็นได้ชัดคือ CP32 ทำการรับไฟล์ภาษา BASIC ถ้าผู้ใช้ตั้งค่า LINE PACING น้อยเกินไปเมื่อส่งบรรทัดที่ยาวมากๆ ไปแล้วในบรรทัดต่อไป CP32 จะรับไม่ได้หรือได้ไม่ครบเครื่องจากเมื่อรับข้อมูลได้ 1 บรรทัด CP32-BASIC จะทำการแปล (INTERPRET) ASCII ที่ส่งมาให้อยู่ในรูปที่ของรหัส (TOKEN) ของภาษาเบสิคจึงทำให้กลับมารับบรรทัดต่อไปไม่ทัน

   การตั้งค่า CHARACTER PACING และ LINE PACING ทำได้โดยการ
   - กด ALT-S
   - เลือก MENU ของ ASCII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือก D หรือ E เพื่อที่จะแก้ไข CHARACTER PACING หรือ LINE PACING ตามลำดับ

ในกรณีที่ทำการส่งไฟล์ที่เป็น INTEL HEX FORMAT ผู้ใช้อาจตั้งค่า CHARACTER PACING และ LINE PACING อาจมีค่าต่ำสุดได้เนื่องจากคำสั่ง DLOAD ซึ่งใช้ในการรับข้อมูลที่เป็น HEX นั้นทำงานได้เร็วพอ

3.2 การกำหนด SOLFTWARE FLOW CONTROL (XON/XOFF)

ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นแล้วว่า การรับและส่งไฟล์แบบ ASCII นี้มีการทำ HAND CHEK น้อยที่สุดคือ มีเพียงตรวจสอบ XON/XOFF (^Q/^S) เมื่อเราใช้ CP32 ร่วมกับเครื่อง PC ที่มีความเร็วต่ำเช่นเครื่อง PC/XT เมื่อทำการส่งไฟล์จาก CP32 มายัง PC จะพบปัญหาเมื่อ BUFFER ของ PC ในการรับไฟล์เกิดเต็มจะทำให้รับข้อมูลบางช่วงที่ CP32 ส่งมาไม่ได้ แต่ถ้าผู้ใช้เซท SOLFTWARE FLOW CONTROL ให้ ON เมื่อ CP32 ส่งข้อมูลมาจนเต็มใน BUFFER ของ PC โปรดอมจะส่ง XOFF (^S) มาให้ CP32 เพื่อขอให้หยุดการส่งและเมื่อข้อมูลใน BUFFER ถูกนำออกไปแล้วโปรดอมจะส่ง XON (^Q) มาเพื่อให้ CP32 ทำการส่งข้อมูลต่อไป

การเซท SOLFTWARE FLOW CONTROL ทำได้โดย

- กด ALT-S
- เลือก TERMINAL เลือก GENERAL (MENU ย่อย)
- กด C
- ใช้ SPACE BAR เป็นตัวเลือก ON/OFF
- กด ENTER

<u>หมายเหตุ</u> รายละเอียดทางเทคนิคอื่นๆขอให้ดูจากคู่มือของ PROCOMM PLUS V1.1B

การทำ AUTO EXECUTE

เนื่องจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นด้วย CP32-BASIC ซึ่งต้องใช้ร่วมกับบอร์ด CP32 ผู้ใช้สามารถสั่งให้บอร์ด CP32 ปฏิบัติตามโปรแกรมนั้นได้ทันทีที่จ่ายไฟให้กับบอร์ด CP32 โดยที่ไม่ต้องรอการกดคีย์ SPACE BAR บนคีย์บอร์ด ในขณะพัฒนาระบบอยู่นั้นสามารถทดสอบการทำ AUTO EXECUTE ได้โดยการใช้ คำสั่ง EITPROG เก็บโปรแกรมที่กำลังพัฒนาไว้ที่หน่วยความจำ 8010H และใช้คำสั่ง EITPROG2 ซึ่งเป็นคำสั่งให้บอร์ด CP32 ปฏิบัติตามคำสั่งในโปรแกรมแรกที่เก็บไว้ที่ 8010H ทันทีที่จ่ายไฟให้กับ CP32 ในกรณีที่ใส่ BATTERY BACK UP บนบอร์ด CP32 ผู้ใช้สามารถทดสอบได้โดยการปิดไฟที่จ่ายให้กับบอร์ด CP32 แล้วจ่ายไฟให้กับบอร์ด CP32 อีกครั้งโปรแกรมแรกที่อยู่ที่ 8010H จะถูก EXECUTE ทันที

เมื่อโปรแกรมทำงานถูกต้องตามต้องการแล้วจึงจะนำโปรแกรมไป PROGRAM ลงใน EPROM ซึ่งมีวิธีการเตรียมไฟล์ที่จะนำไป PROGRAM EPROM ดังนี้

```
>ROM    <CR>
>UPLOAD "File name" 8000h,8000h+LEN+16  <CR>
```

เมื่อส่งข้อมูลเสร็จก็จะได้ไฟล์ซึ่งอยู่ในรูปของ INTEL HEX FORMAT ซึ่งเป็นไฟล์ที่สามารถนำไป PROGRAM ลงใน EPROM ได้ ในกรณีที่ผู้ใช้ ใช้บอร์ด ET.BURNER สามารถทำการโหลดไฟล์นี้ได้ทันทีเพราะไฟล์ที่ได้จะมี ORIGIN ที่ 8000H ซึ่งตรงกับ BUFFER ของบอร์ด ET.BURNER พอดี

ในกรณีที่ต้องการเก็บโปรแกรมภาษาเบสิคในที่อยู่ใน RAM ให้อยู่ในรูปของ INTEL HEX FORMAT เมื่อที่โหลดกลับลงมาในหน่วยความจำได้เร็วกว่าโหลด TEXT FILE ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน โดยยกตัวอย่างคำสั่งดังนี้

```
>RAM      <CR>
>UPLOAD "File name" 200h,200h+LEN-1 <CR>
```

และเมื่อต้องการโหลดกลับลงมาในหน่วยความจำ RAM เพื่อพัฒนาโปรแกรมต่อ ก็เพียงแต่สั่ง

```
DLOAD "File name"
```

*** ดูคำสั่ง PROG (1-6) ในคู่มือ MCS BASIC-52 ***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างโปรแกรม

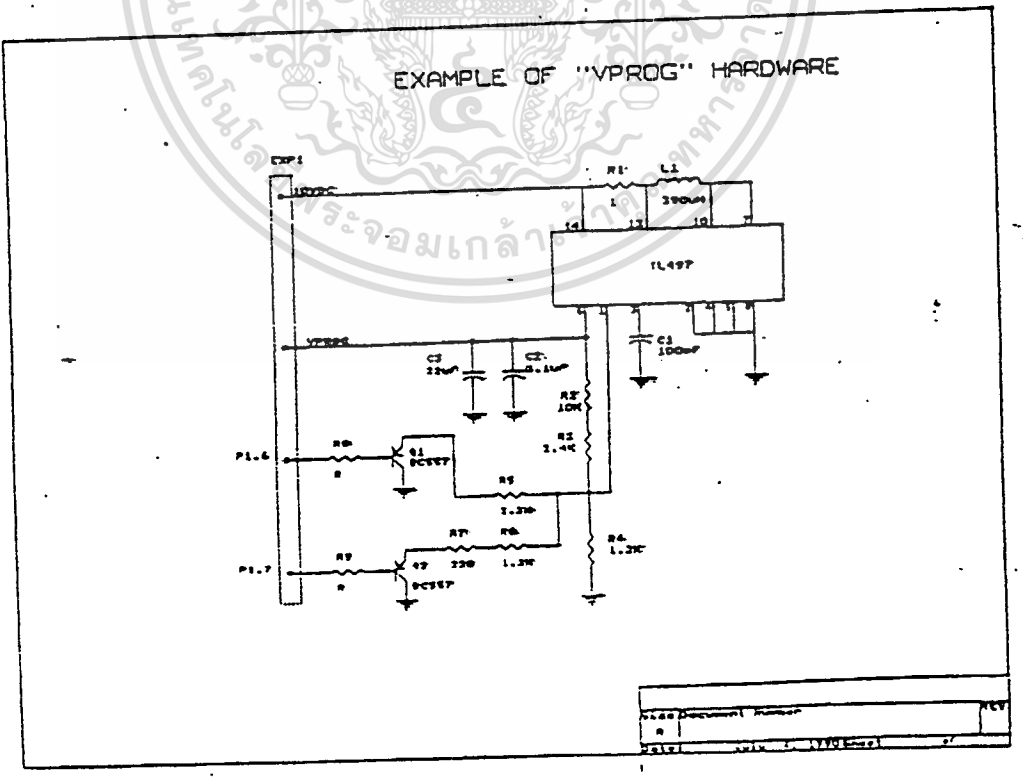
ตัวอย่างที่1 ชื่อ BSHOW.BAS เป็นโปรแกรมแสดงโครงสร้างของตัวโปรแกรมภาษาเบสิคในหน่วยความจำ ซึ่งแทนที่จะเก็บเป็น TEXT อย่างที่เราเห็นในขณะทำการ LIST แต่กลับประกอบด้วยส่วนต่างๆ มาก (รายละเอียดขอให้ดูในหนังสือ MCS BASIC-52 หน้า 188)

```
LIST
100   C=0200H
110   LNG=XBY(C)
120    IF LNG=01 THEN 250
130    PRINT "ADDRESS"
140    PHI. C,
145   COUNT=0
150    FOR I=1 TO LNG
160   A=XBY(C)
170    PHO. A,
180   C=C+1
185    IF I=COUNT+16 THEN GOSUB 270
190    NEXT
200    PRINT
210   LNG=XBY(C)
220    IF LNG=01 THEN  END
230    GOTO 140
250    PRINT "NO BASIC PROGRAM"
260    PRINT CHR(7) :  END
270    PRINT  :  PRINT
280   COUNT=COUNT+16
290    RETURN
300    END

READY
)
```

ตัวอย่างที่2 ชื่อ ERASE.BAS เป็นโปรแกรมสนับสนุนการ CLEAR EEPROM ในโปรแกรมจะทำให้ข้อมูลใน EEPROM แอดเดรส 8000-9FFFH เป็น FFH แต่ถ้าใครต้องการให้เป็น 00 ให้เปลี่ยนบรรทัดที่ 200 เป็น XBY(I)=00

```
 LIST
100   C=0
120    PRINT "WAIT..."
140    FOR I=8000H TO 9FFFH
145    PHO. I, CR ,
160   A=XBY(I)
180    IF A=0FFH THEN 340
200   XBY(I)=0FFH
220    FOR D=1 TO 3 :  NEXT
240   A=XBY(I)
260    IF A=0FFH THEN 340
280    PRINT "ERROR :",
300    PHO. I
320    PRINT
340   C=C+1
360    IF C=1024 THEN 400
380    GOTO 460
400   C=0
420    PRINT "PASS :",
440    PHO. I
460    NEXT
480    PRINT "ALL ERASED"

READY
)
```

ตัวอย่าง VPROG CARD



ผนวก ก.

การเซท DIP SW.และ JUMPER

บอร์ดCP32 มีหน่วยความแรมที่ใช้เป็น DATA AREAR ในระบบ 8K-32K ซึ่งเลือกได้โดย JUMPER J2 ดังนี้

JUMPER J2

U4 = 6264

U4 = 62256

นอกจากนี้หน่วยความจำในตำแหน่ง 8000H ยังเลือกใช้ได้ทั้ง ROM และ RAM ดังนี้

DIP SW-2

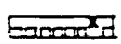
2764

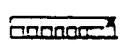
27128

27256

6264

62256


BAT ON


BURN EPROM

หมายเหตุ ** สำหรับ 2764 sw2 ทุกตัวจะอยู่ในตำแหน่ง OFF **

J1 เป็นการเลือกว่าจะใช้หน่วยความจำภาใน หรือ ภายนอก ในกรณีที่ใช้ CPU 8052

J1 ใส่ JUMPER =ใช้หน่วยความจำภายนอก

J1 ไม่ใส่ JUMPER =ใช้หน่วยความจำภายใน

SW.3 ใช้ในการ PROGRAM EPROM เท่านั้น

SW.3 Turn on (ขึ้นด้านบน)=จะทำการ PROGRAM EPROM

SW.3 Turn off(อยู่ด้านล่าง)=ใช้ได้ทั้ง RAM และ EPROM

J3 VPROG CONNECTOR สำหรับนำไฟสูงเข้าในการ PROGRAM EPROM

RS232 ใช้ต่อกับ เครื่อง PC

คำเตือน

1. เมื่อทำการเปิดเครื่องหรือ กดปุ่มรีเซท CP32 จะทำการหาขนาดของหน่วยความจำ ตั้งแต่ตำแหน่ง 0000H-DFFFH ถ้าผู้ใช้ใส่ RAM ขนาด 32K และที่ตำแหน่ง 8000 ก็เป็น RAM เช่นกัน ที่ตำแหน่ง 8000H จะถูก CLEAR ไปด้วย ในกรณีที่ผู้ใช้ใช้หน่วยความที่ตำแหน่ง 8000H เป็น VIRTUAL DISK แล้วให้ทำการ WRITE PROTECT ก่อนที่จะทำการ ปิด-เปิดเครื่อง หรือ รีเซทระบบ
2. ก่อนการใช้ CP32 ทุกครั้งควรตรวจดูว่าที่ SW3 อยู่ในตำแหน่งการ PROGRAM EPROM หรือไม่ ซึ่งควรอยู่ในตำแหน่ง OFF สำหรับการใช้งานปกติ
3. เมื่อจะทำการ PROGRAM EPROM ต้องปฏิบัติดังนี้
   - ตรวจดูว่า เซท DIP SW2 ถูกต้องตามเบอร์ไอซีหรือไม่
   - SW3 ต้องอยู่ในตำแหน่ง ON (SW อยู่ด้านบน)
   - SW2.7 ต้องอยู่ในตำแหน่ง ON (LED สีเขียวจะดิด)
   - CPU ต้องเป็นเบอร์ 8052AH BASIC V1.1
   - J1 ต้องไม่ใส่ JUMPER
   - ไม่ VPP ได้เลือกไว้ถูกต้องแล้ว
4. ในกรณีผู้ใช้ใส่ EPROM หรือ E^2PROM ต้องไม่ ON BACK UP

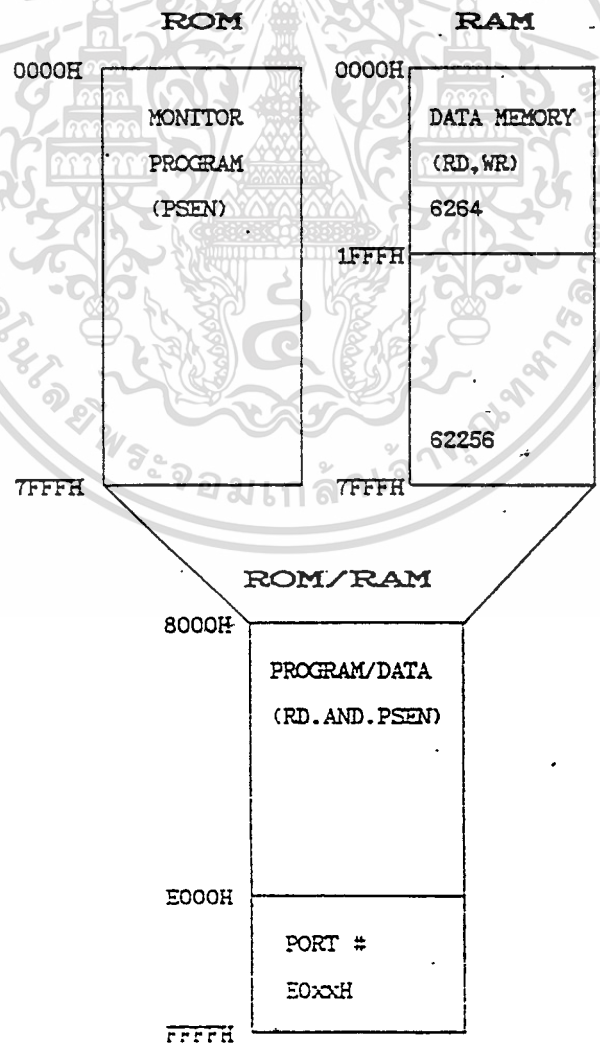
5. ขาวีเซทที่ต่อไว้ที่ EXP2 นั้นเป็น สัญญาณอินพุทให้กับ บอร์ด CP32 ซึ่งต้องการ LOGIC 1 ฉะนั้นการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ประกอบของ ET.BOARD V3.0 ให้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณรีเซทด้วย ตัวอย่างเช่น การใช้งานร่วมกับ 72IO ที่บอร์ด 72IO ต้องเลือกสัญญาณรีเซทเป็นแบบ POWER ON RESET
6. เนื่องจาก CP32-BASIC ไม่มีระบบ FULL SCREEN EDIT จึงไม่สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดในบรรทัดที่ได้คีย์เรียบร้อยแล้ว มีทางเดียว คือ คีย์ใหม่(แต่ใน VERSION 2.0 ใช้คำสั่ง EDIT ได้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภาคผนวก ข

MEMORY MAP/MEMORY USAGE

การจัดหน่วยความจำของ CP32 จะแยกกันระหว่างหน่วยความจำสำหรับข้อมูล (DATA MEMORY) กับหน่วยความจำที่เป็นโปรแกรม โดยแยกสัญญาณการติดต่อหน่วยความจำทั้งสองชนิด คือใช้ สัญญาณ PSEN ในการติดต่อกับหน่วยความจำที่เป็นโปรแกรม และ สัญญาณ RD,WR ในการติดต่อกับหน่วยความจำข้อมูล CP32 ได้จัดหน่วยความจำดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

การ DECODE PORT

เนื่องจาก CPU ในตระกูล MSC51 ไม่มีสัญญาณ IORQ จึงจำเป็นต้องสร้างสัญญาณ IORQ เทียมขึ้นมาโดยการ ทำ PORT ให้เป็นเหมือนหน่วยความจำ ในการติดต่อกับ PORT นั้นให้อ้างไปที่หน่วยความจำตำแหน่ง E000H จะทำให้เกิดสัญญาณ IORQ เทียมขึ้น ฉะนั้นเบอร์พอร์ตจริง DECODE ด้วยไบท์ต่ำ ฉะนั้นชื่อพอร์ตที่ CP32 มองเห็นจึงมีชื่อเป็น E0xxH ซึ่ง xx ก็คือแอดเดรสไบท์ต่ำนั่นเอง

พอร์ต 8255 บน CP32 มีตำแหน่งอยู่ที่ E0E0-E0E3H โดยเป็นพอร์ต A,B,C และพอร์ตพอร์ตควบคุมตามลำดับ

การใช้หน่วยความจำภายใน (INTERNAL MEMORY USAGE)

เนื่องจากหน่วยความจำภายในถูกใช้ไปโดยตัวแปลภาษาเบสิคเป็นจำนวนมาก เหลือไว้ให้ผู้ใช้บ้างก็แต่เพียง ตำแหน่ง 18H ถึง 21H แต่ในกรณีที่ผู้ใช้ ใช้คำสั่งที่เพิ่มเติมขึ้นจะทำให้หน่วยความจำภายในที่เหลือในตำแหน่ง 18H ถึง 21H ถูกใช้ไปด้วย ฉะนั้นถ้าผู้ใช้ ต้องการใช้ภาษาเบสิคร่วมกับภาษาแอสเซมบลี้ ที่ผู้ใช้เขียนขึ้นแล้วต้องระวังในการใช้หน่วยความจำช่วงดังกล่าว ในกรณีนี้แนะนำให้ผู้ใช้หลบไปใช้หน่วยความจำภายนอกแทน รายละเอียดของการใช้หน่วยความจำดูได้จาก คู่มือ MSC BASIC-52

หน่วยความจำที่ CP32 ใช้ นอกเหนือจากที่กำหนดในหนังสือคู่มือ MCS BASIC-52

1. หน่วยความจำภายใน ตำแหน่ง 18H ถึง 21H และ 44H
2. บิทที่เข้าถึงแบบบิท ตำแหน่ง 23H (ใช้เป็น FLAG)
3. หน่วยความจำภายนอก ตำแหน่ง 00-03H (RAM)

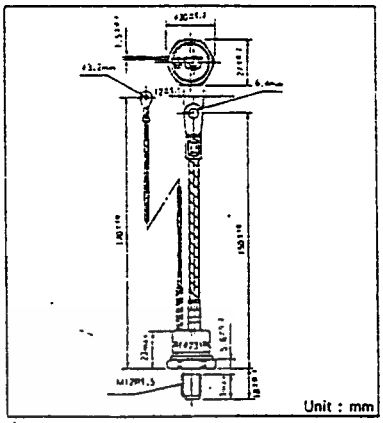
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ข้อมูลของเอสซีอาร์และเฟสทริกเกอร์โมดูล

SC70C

For general phase control applications such as speed controls, light controls and welders etc.

- General power use
- $I_T = 70A$, $I_{T(RMS)} = 110A$
- High voltage up to 1200V
- High surge current of 2000A
- Stud type



Maximum Ratings

Symbol	Item	SC70C-40	SC70C-60	SC70C-80	SC70C-100	SC70C-120	Unit
V_{RRM}	Repetitive Peak Reverse Voltage	400	600	800	1000	1200	V
V_{RSM}	Non-Repetitive Peak Reverse Voltage	480	720	960	1100	1300	V
V_{DRM}	Repetitive Peak Off-State Voltage	400	600	800	1000	1200	V

Symbol	Item	Conditions	Ratings	Unit
$I_{T(AV)}$	Average On-State Current	Single phase, half wave, 180° conduction, Tc : 83°C	70	A
$I_{T(RMS)}$	R.M.S On-State Current	Single phase, half wave, 180° conduction, Tc : 83°C	110	A
I_{TSM}	Surge On-State Current	1/2 cycle, 50Hz/60Hz, peak value, non-repetitive	1,800/2,000	A
I^2t	I^2t	Value for one cycle of surge current	16,600	A^2S
P_{GM}	Peak Gate Power Dissipation		10	W
$P_{G(AV)}$	Average Gate Power Dissipation		1	W
I_{FGM}	Peak Gate Current		3	A
V_{FGM}	Peak Gate Voltage(Forwad)		10	V
V_{RGM}	Peak Gate Voltage(Reverse)		5	V
di/dt	Critical Rate of Rise of On-State Current	SC70C-40~60 | I_G=100mA, Tj=25°C, $V_D = 1/2\ V_{DRM}$, dI_G/dt=0.1A/μs	50	A/μs
		SC70C-80~120	200	
Tj	Operating Junction Temperature		−30~+125	°C
Tstg	Storage Temperature		−30~+125	°C
	Mounting Torque	Recommended Value 112kgf·cm	140	kgf·cm
	Mass	Excluding nut, washer 13g and wrapping material 23g	96	g

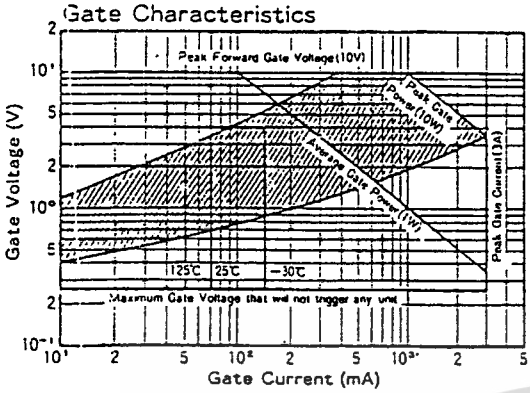
Electrical Characteristics

Symbol	Item	Conditions	Ratings	Unit
I_{DRM}	Repetitive Peak Off-State Current, max.	at V_{DRM}, single phase, half wave, Tj=125°C	10	mA
I_{RRM}	Repetitive Peak Reverse Current, max.	at V_{DRM}, single phase, half wave, Tj=125°C	10	mA
V_{TM}	Peak On-State Voltage, max.	On-State Current 220A, Tj=25°C Inst. measurement	1.5	V
I_{GT}/V_{GT}	Gate Trigger Current/Voltage, max.	Tj=25°C, I_T=1A, V_D=6V	70/3	mA/V
V_{GD}	Non-Trigger Gate, Voltage, min.	Tj=125°C, $V_D = 1/2\ V_{DRM}$	0.25	V
tgt	Turn On Time, max	I_T=70A, I_G=100mA, Tj=25°C, $V_D = 1/2\ V_{DRM}$, dI_G/dt=0.1A/μs	10	μs
dv/dt	Critical Rate of Rise of On-State Voltage, min.	SC70C-40~60 | Tj=125°C, $V_D = 2/3\ V_{DRM}$	100	V/μs
		SC70C-80~120 | Tj=125°C, $V_D = 2/3\ V_{DRM}$	200	
I_H	Holding Current, typ.	Tj=25°C	50	mA
Rth(j-c)	Thermal Impedance, max.	Junction to case	0.4	°C/W

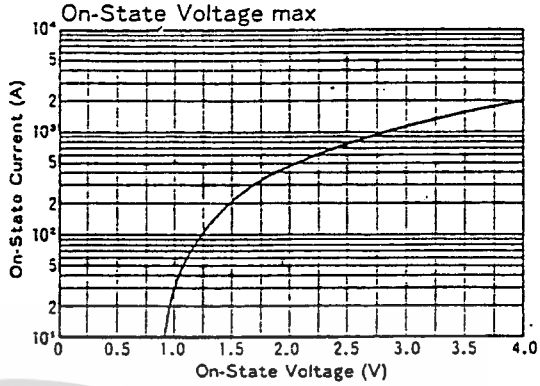
* mark : Thyristor and Diodo part. No mark : Thyristor part

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

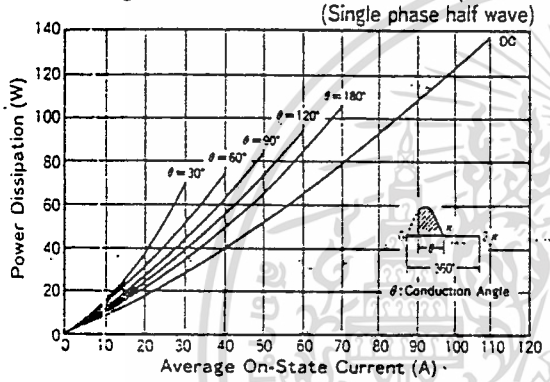
Gate Characteristics



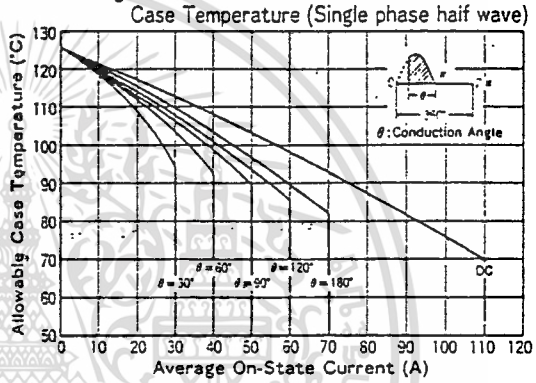
On-State Voltage max



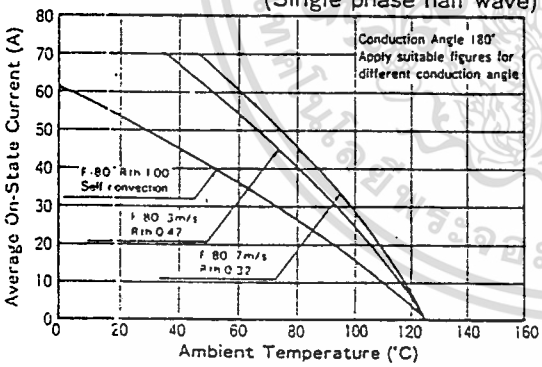
Average On-State Current Vs Power Dissipation (Single phase half wave)



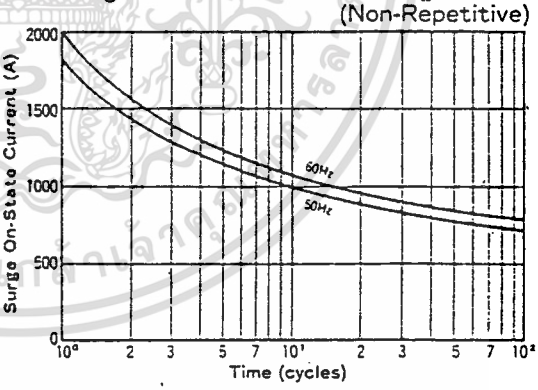
Average On-State Current Vs Maximum Allowable Case Temperature (Single phase half wave)



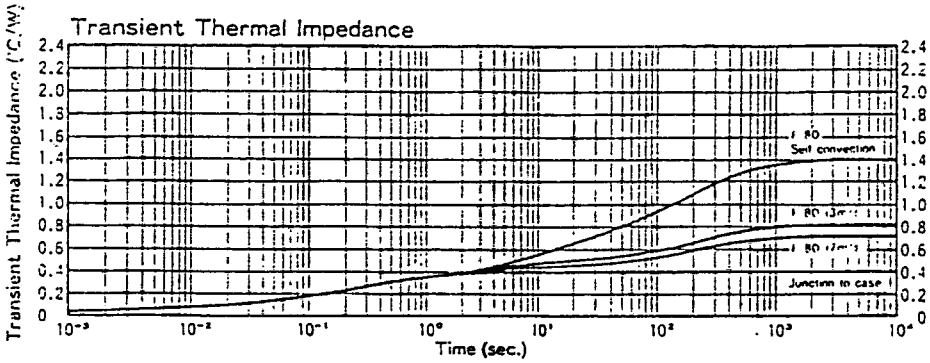
Ambient Temperature Average On-State (Single phase half wave)



Surge On-State Current Rating (Non-Repetitive)



Transient Thermal Impedance



THYRISTOR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Issued March 1990 10451

RS

Data Library

Power controllers

Stock numbers 658-148, 658-154, 658-160

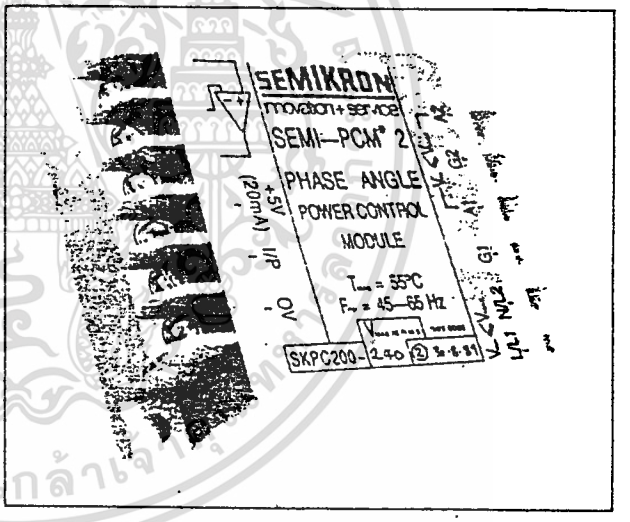
A range of trigger modules for use in general purpose thyristor drive applications.

SKPC 200-240 Phase angle trigger module 658-148

A phase angle trigger module to provide the control signals for an ac load, half controlled B2HZ or a half controlled B2HK single phase bridge eg. SKCH 28/08 262 999.

Features

- Separate 240V ac ± 10% control supply allowing the load circuit to run on a lower supply voltage
- Output gate drive is short circuit protected
- Will operate on both 50 and 60Hz supplies
- Built in uncommitted op-amp for closed loop control use if required
- Improved control characteristics
- Low voltage and high voltage terminals with mechanical separation
- Screw terminals for ease of connection.



Absolute maximum ratings (Unless otherwise stated: V=240V, 50Hz T_{amb} = +20°C)

Parameter	Conditions	Symbol	Limits Min.	Typ.	Max.	Units
Supply voltage	V_{ac} across terminals 11 and 12	V_s	210	240	264	V_{rms}
Gate driver withstand	V_{ak} across terminals 7 and 9	V_{DRM}	600			V
Operating temperature		T_{op}	0		55	°C
Isolation voltage	60Hz ac for 1 minute	V_{isol}	2500			V_{rms}
Gate drive s/c output duration	Thermal limiting	TI_{sc}		Continuous		
Input terminal voltage	V_{in}	V_{in}			25V	V
Operating frequency	V_s across terminals 11 and 12	F_{op}	45		65	Hz
Power requirements	Terminals 11 and 12, V_{in}=Max	P			2	VA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

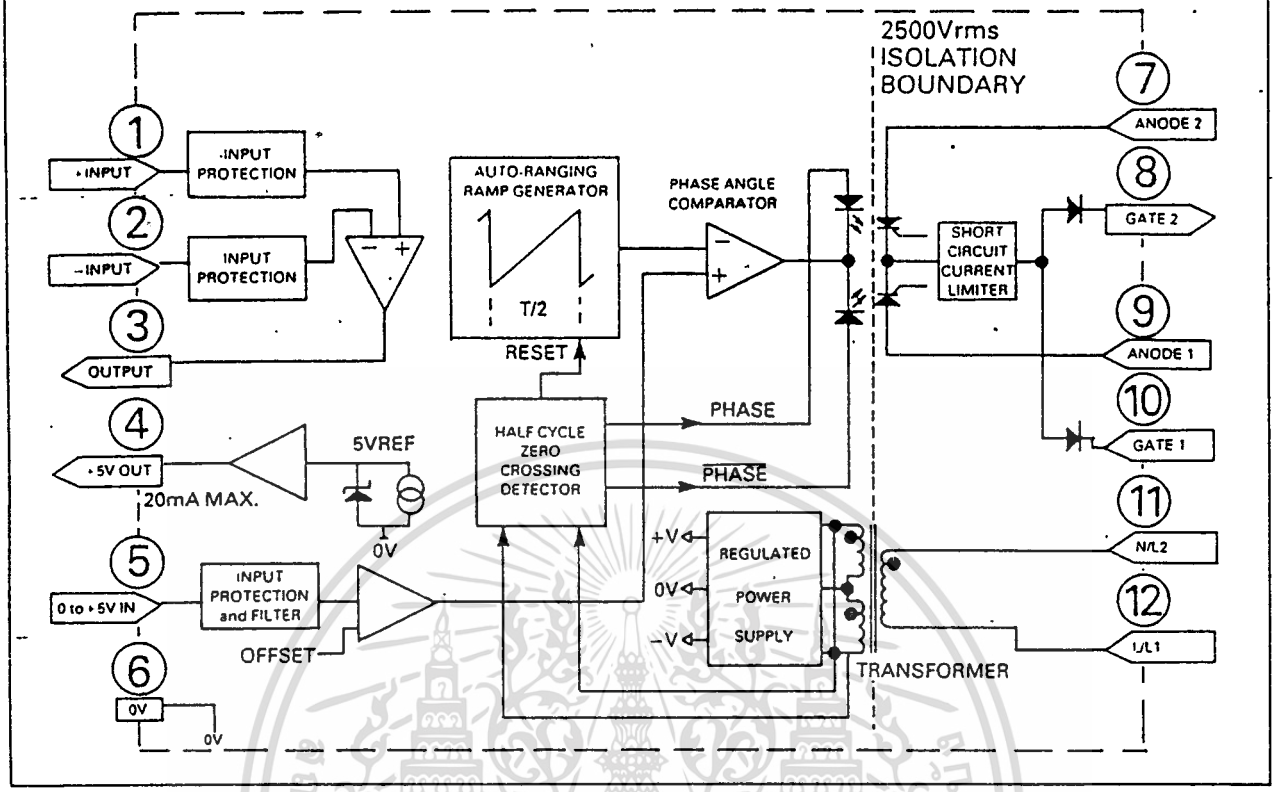
Electrical characteristics Unless otherwise stated: V=240V, 50Hz T_{AMB} = +20°C

	Parameter	Conditions	Symbol	Limits Min.	Typ.	Max.	Units
5V Reference	Reference output	Terminals 4 to 6	V_{ref}	+4.5	+5.0	+5.25	V
	Current source ability	Terminals 4 to 6	I_{ref}	20			mA
	Short circuit current	Terminals 4 to 6, V_{ref}=0			40		mA
	Load regulation	I_{ref}=0 to 20mA	ΔV_{ref}		2		%
	Temperature stability	Terminals 4 to 6	$\Delta V_{ref}/\Delta T$		2	5	mV/°C
Uncommited Op Amp	Input voltage range	Terminal 1 or Terminal 2	V_{AI}	−10.5		+10.5	V
	Common mode range	Terminal 1 and Terminal 2	V_{ACM}	±10			V
	Common mode rejection ratio		CMRR	65	70		dB
	Input offset voltage	Between terminals 1 and 2			±2	±7	mV
	Large signal voltage gain	R_L≥2K between 3 and 6	Av	25	100		V/mV
	Short circuit current	R_L=0 between 3 and 6				12	mA
	Output swing	Terminal 3 R_L=10K		±10			V
Phase angle input	Control range maximum	Terminals 5 to 6	V_{IMAX}	+4.5	+5	+5.25	V
	Input threshold	Terminals 5 to 6	V_{ITH}	0.1	0.3	0.6	V
	Input impedance	Terminals 5 to 6	R_I	100K	110K		Ω
	Input filter time constant	Terms. 5 to 6 (1st order LPF)	TC_I		0.5		ms
Phase angle range	Controllable retard angle	$V_{IN}=V_{ITH}$ fop=45-65Hz	$<F_{MAX}$		180		Degrees
	Controllable advance angle	$V_{IN}=V_{IMAX}$ fop=45-65Hz	$<F_{MIN}$	0		10	Degrees
Gate driver	Peak gate current	V_S=Max, <F=90°	I_{OMAX}			1.9	A
	Short circuit protection time	$V_{AB}=V_S$, <F=0°	t_oS/C		250	500	ms
	Rep. forward voltage withstand	Between 7 and 9, *or* 9 and 10	V_{ODRM}	600			V
	Breakover voltage	Between 7 and 9, *or* 9 and 10	V_{OBO}		480		V_{rms}
	Rise time (10% to 90%)	V_s=max, 0=90°	t_{OR}		10		μs
	Offstate leakage current	V_s=max, V_{IN}=0V	I_{OL}			1	μA
	Critical rate of rise of off-state voltage	V_{ODRM}=½ Rated	$(dv/dt)_{CR}$	500			V/μs
	Isolation resistance input to output circuitry	dc=500V RH=40-60%		$5x10^{10}$	10^{11}		Ω
	Typical gate current	<F0=0°	I_O		10^{-2}		A_{rms}
	Mismatch of ½ cycles firing			0	1	2	Degree

Parameter	Conditions	Symbol	Limits Min.	Typ.	Max.	Units
Storage temperature		T_{ST}	−40		+125	°C
Operating humidity	Non-condensing	RH			80	%RH
Mounting torque	M5 bolt, 2 places	MT			2	Nm
Flame retardance	Surface flammability to US Underwriters' Laboratories			UL94-V0		
Weight		W		320		gm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Figure 1 Block diagram

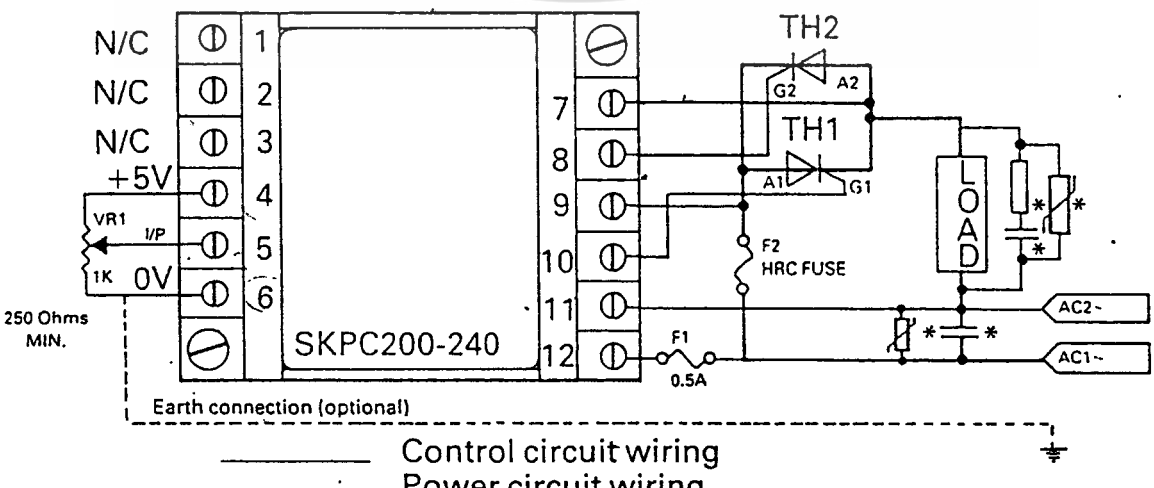


Application circuits

The following application circuits illustrate the connections necessary for the various modes of operation. Optional snubber network components are shown where fast $\frac{dv}{dt}$ rise time conditions exist. A suitable unit is the RS 623-338 snubber network.

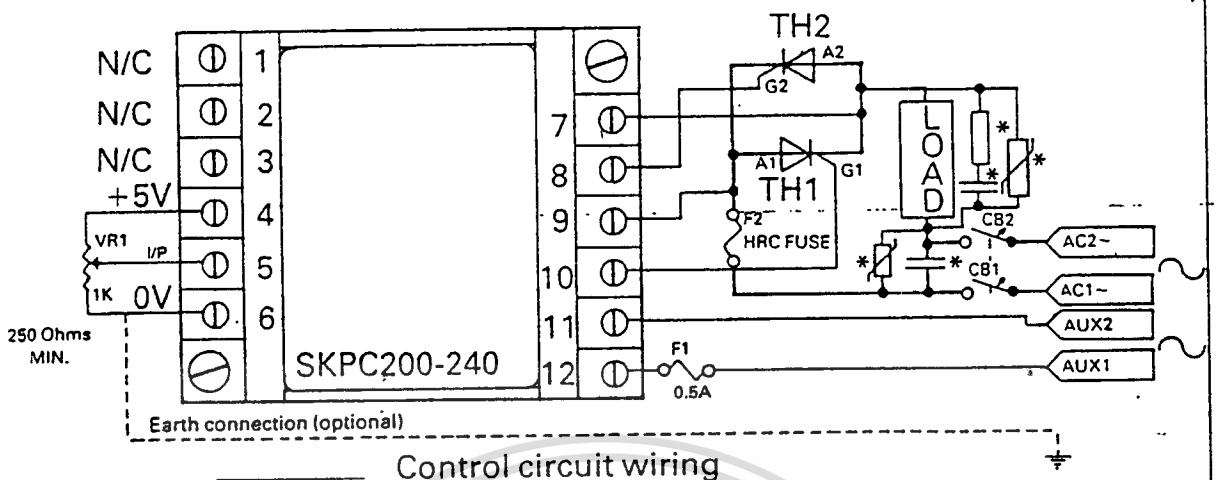
Metal oxide varistors are shown for protection against transient overvoltage.

Figure 2 Basic ac regulator (W1C) wiring



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 3 ac regulator (W1C) with auxiliary supply

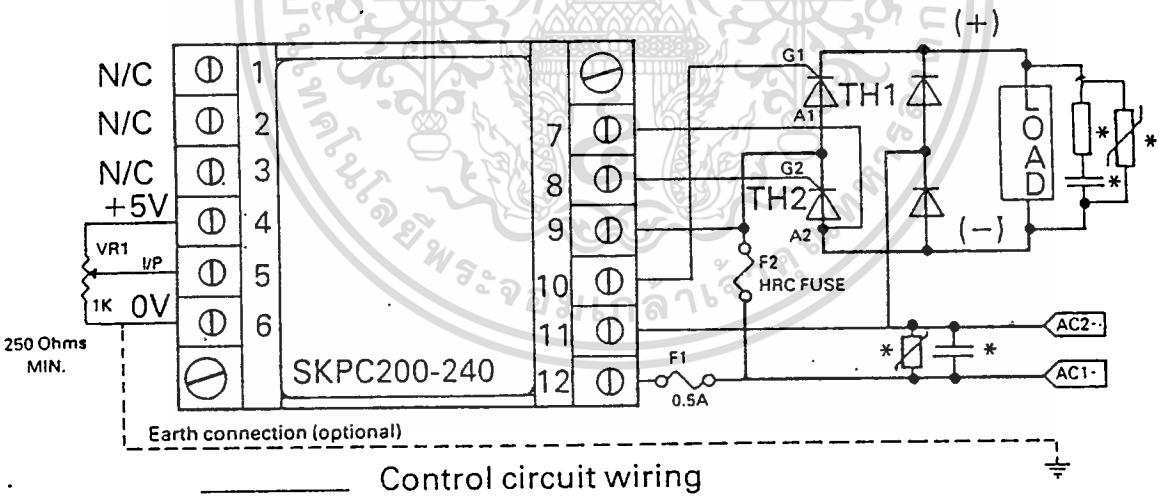


Control circuit wiring
Power circuit wiring

NB Auxiliary supply must be in phase with main supply (as shown).

*Optional components (see text)

Figure 4 Half controlled dc bridge (B2HZ) wiring



Control circuit wiring
Power circuit wiring

*Optional components (see text)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Figure 5 Alternative half-controlled dc bridge (B2HKF) wiring

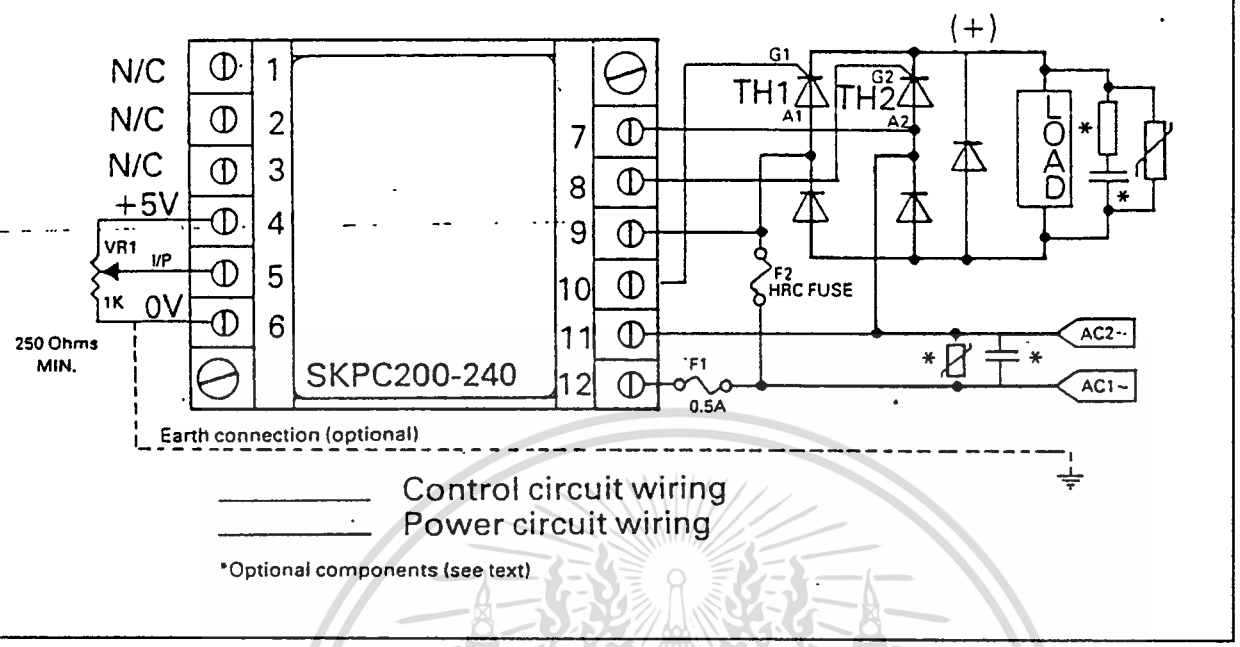
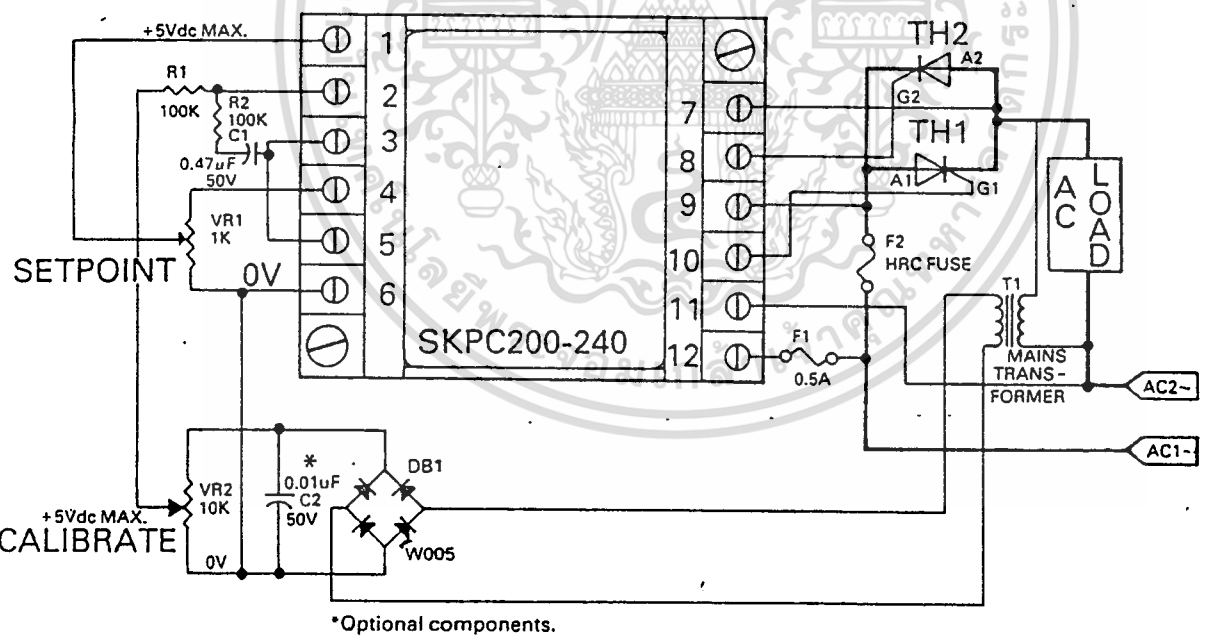


Figure 6 Closed loop isolated ac voltage controller



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1451

Figure 7 Closed loop isolated dc current controller

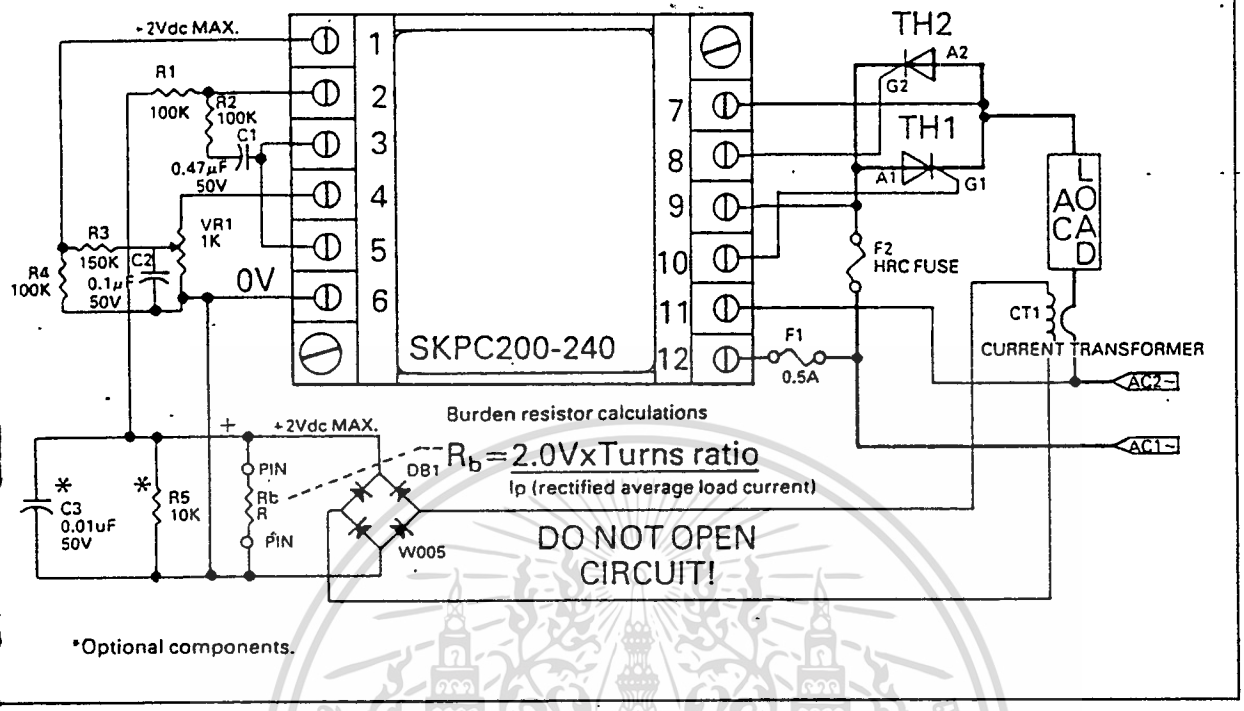
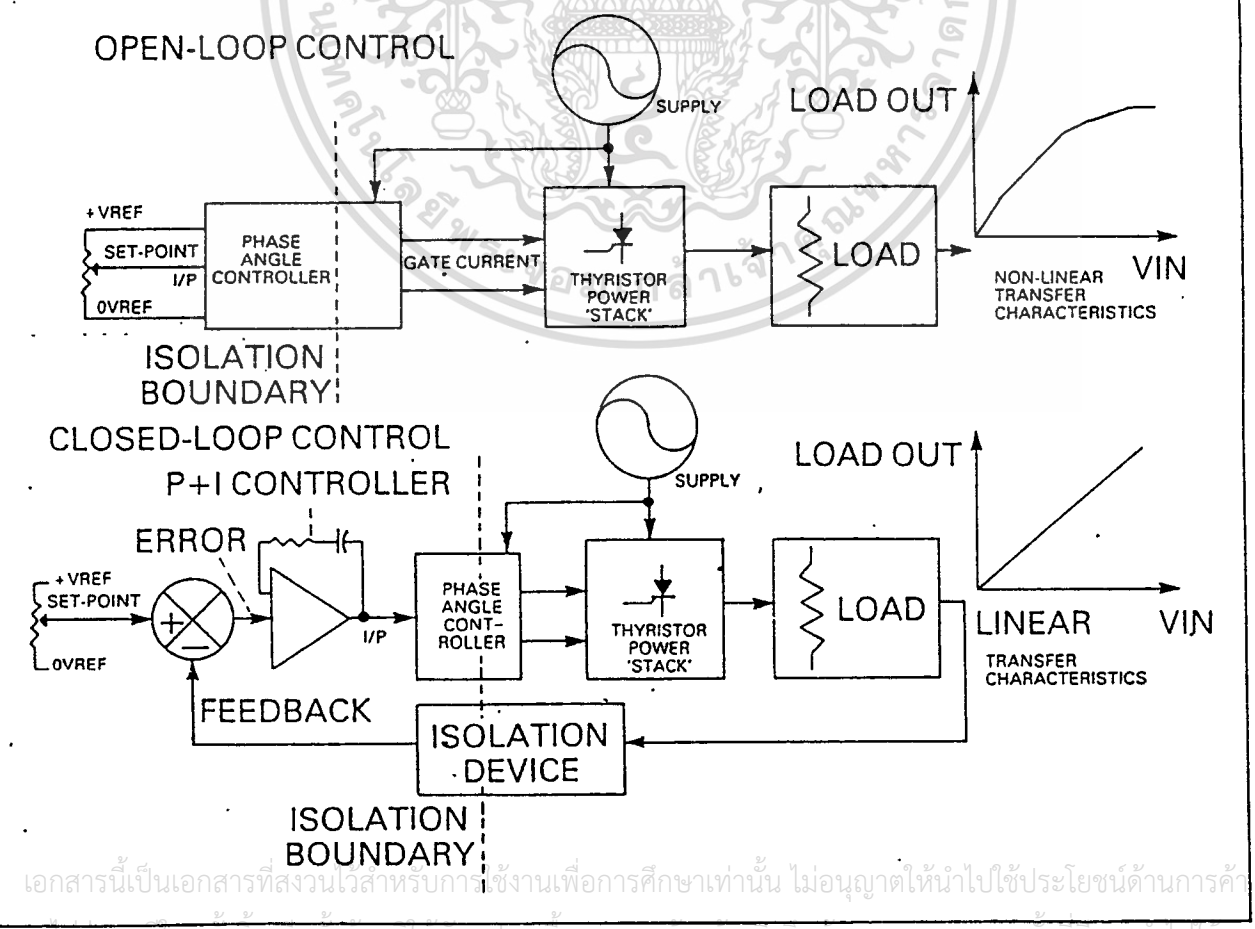


Figure 8 Control diagrams



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Figure 9 Phase angle control voltage transfer

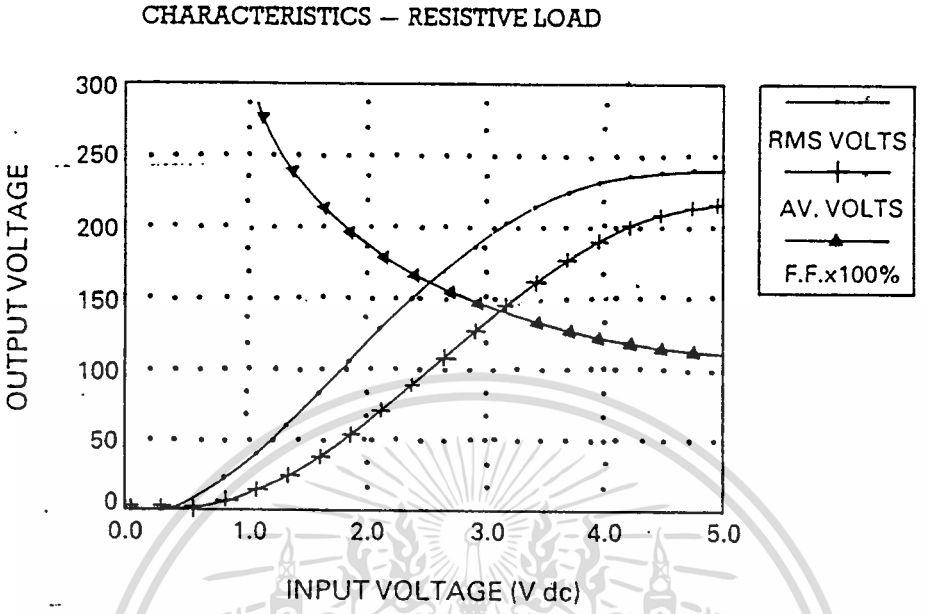
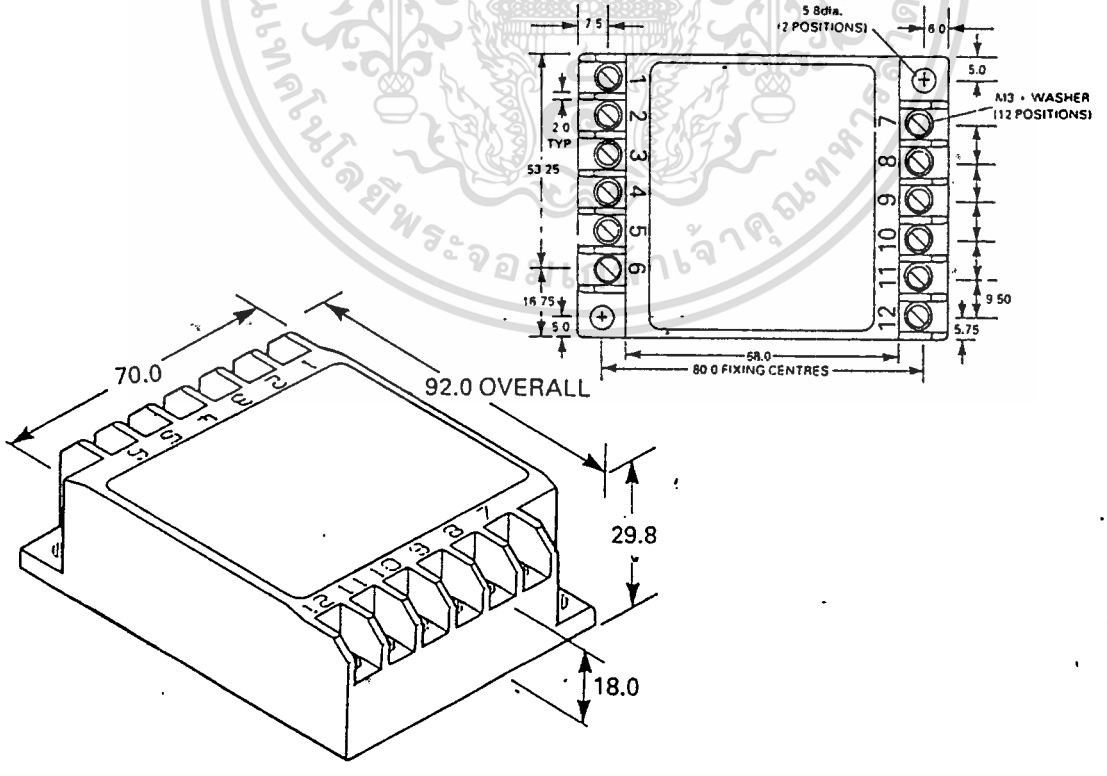


Figure 10 Dimensions of SKPC200-240 module



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ภาคผนวก จ.

หลักการเบื้องต้นของการควบคุมกระบวนการ

การควบคุมการผลิตสามารถแบ่งระบบควบคุมได้ 2 แบบ คือ ระบบควบคุมแบบลูปปิด (closed-loop) และแบบลูปเปิด (open-loop) ระบบควบคุมแบบลูปปิดจะเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control) การควบคุมแบบนี้จะนำมาใช้เมื่อไม่ทราบการเปลี่ยนแปลงของอินพุท (input) การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ (parameters) ของอุปกรณ์ในระบบ หรือการเกิดสัญญาณรบกวน (disterbance) โดยไม่คาดคิดมาก่อน สำหรับระบบควบคุมแบบลูปเปิดเป็นการควบคุมที่ไม่มีการป้อนกลับ ดังนั้นการควบคุมนี้จะเหมาะสมกับระบบที่ทราบว่าอินพุทของระบบจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร และแน่ใจว่าไม่มีการรบกวนทั้งภายในและภายนอก

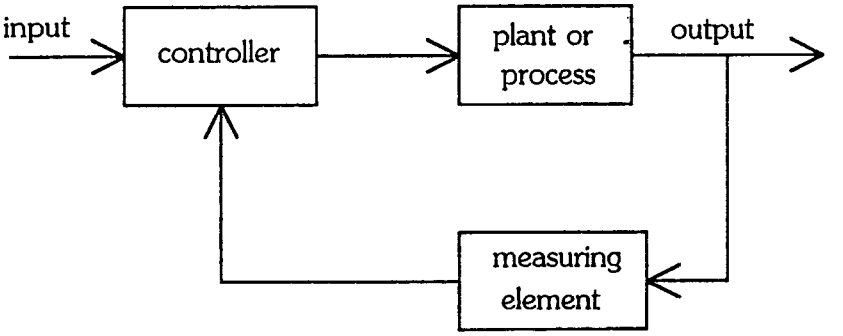
ในกรณีระบบควบคุมแบบลูปปิด เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบหรือการเกิดสัญญาณรบกวนโดยไม่คาดคิดมาก่อน ดังนั้นจึงต้องเลือกกิริยาการควบคุม (control action) ของหน่วยควบคุม (controller) และเลือกค่าพารามิเตอร์ของกริยาควบคุมเพื่อให้การควบคุมมีเสถียรภาพ (stable) และมีผลตอบสนองตามต้องการ

การควบคุมแบบลูปปิดและลูปเปิด

ระบบการควบคุมแบบลูปปิด

ระบบการควบคุมแบบนี้ เป็นระบบควบคุมที่นำสัญญาณเอาท์พุท (output) ป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุทที่ต้องการ สัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน (actuating error signal) ซึ่งเป็นสัญญาณแตกต่างระหว่างสัญญาณอินพุทกับสัญญาณป้อนกลับ จะถูกให้กับหน่วยควบคุมเพื่อจะลดค่าความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง และทำให้เอาท์พุทของระบบมีค่าตามที่ต้องการ บล็อกไดอะแกรม (block diagram) ของระบบควบคุมแบบลูปปิดแสดงดังรูปที่ 1.

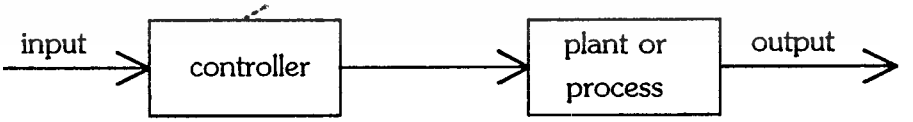
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1. แสดงระบบควบคุมแบบลูปปิด

ระบบควบคุมแบบลูปเปิด

ระบบควบคุมแบบนี้ เป็นระบบควบคุมที่สัญญาณเอาท์พุทของระบบไม่มีผลต่อการควบคุม หรือสัญญาณเอาท์พุทของระบบจะไม่ถูกป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุท รูปที่ 2. เป็นบล็อกไดอะแกรมที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทและเอาท์พุทของระบบควบคุมแบบลูปเปิด ดังนั้นความเที่ยงตรงของระบบควบคุมแบบนี้จึงขึ้นอยู่กับการปรับเทียบ (calibate) และความแม่นยำของอุปกรณ์ที่ใช้ ในทางปฏิบัติแล้วจะสามารถใช้การควบคุมแบบลูปเปิดได้ ถ้าทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทและเอาท์พุทของระบบโดยจะต้องไม่มีสิ่งรบกวนทั้งภายในและภายนอก



รูปที่ 2. แสดงระบบควบคุมแบบลูปเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเปรียบเทียบระหว่างระบบควบคุมแบบลูปปิดกับระบบควบคุมแบบลูปเปิด

จากลักษณะของระบบควบคุมแบบลูปปิด การนำเอาสัญญาณเอาท์พุทมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุท จะสามารถกำจัดหรือลดผลของสิ่งรบกวนจากภายนอกหรือภายในที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบให้น้อยลงได้ ดังนั้นบางครั้งจึงไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงหรือมีราคาแพง แต่ในกรณีของระบบควบคุมแบบลูปเปิดจะไม่เป็นเช่นนี้ กล่าวคือถ้ามีสิ่งรบกวนเกิดขึ้น ก็จะต้องทำการปรับอินพุทหรือพยายามกำจัดสิ่งรบกวนนั้นทิ้งไปเพื่อให้เอาท์พุทมีค่าคงเดิมตามที่ต้องการ ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้จะต้องมีความเที่ยงตรงสูง

สำหรับเสถียรภาพของระบบควบคุมแบบลูปเปิดไม่ใช่ปัญหาใหญ่ เพราะจะเห็นได้ทันทีว่าระบบควบคุมแบบลูเปิดมีเสถียรภาพหรือไม่ต่ออินพุทที่มากระทำ ดังนั้นการทำให้ระบบควบคุมแบบลูปเปิดเป็นระบบที่มีเสถียรภาพจึงเป็นสิ่งที่ทำได้ไม่ยากนัก แต่สำหรับระบบควบคุมแบบลูปิดนั้นเสถียรภาพเป็นปัญหาที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง ทั้งนี้เพราะการนำเอาสัญญาณเอาท์พุทมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุทเพื่อจะลดค่าความคลาดเคลื่อนนั้น อาจจะทำให้เกิดการแกว่ง (oscillate) ได้

กิริยาการควบคุมและหน่วยควบคุมอัตโนมัติ

หน่วยควบคุมอัตโนมัติที่ใช้ในระบบควบคุม จะทำหน้าที่เปรียบเทียบหาค่าความแตกต่าง (ค่าความคลาดเคลื่อน) ระหว่างค่าเอาท์พุทจริงของระบบกับค่าอินพุทอ้างอิง (ค่าที่ต้องการ) จากนั้นจะสร้างสัญญาณควบคุมขึ้นเพื่อที่จะนำไปทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ หรือมีค่าน้อยที่สุด ลักษณะของการสร้างสัญญาณควบคุมของหน่วยควบคุมอัตโนมัติจะเรียกว่า กริยาการควบคุม

หน่วยควบคุมอัตโนมัติที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม สามารถจำแนกออกตามลักษณะของกริยาการควบคุมได้ดังนี้

1. หน่วยควบคุมแบบสองตำแหน่ง (two-position) หรือแบบ on-off
2. หน่วยควบคุมแบบ proportiona
3. หน่วยควบคุมแบบ integral
4. หน่วยควบคุมแบบ proportional-integral หรือเรียกง่าย ๆ ว่า หน่วยควบคุมแบบ PI
5. หน่วยควบคุมแบบ proportional-derivative หรือเรียกง่าย ๆ ว่า หน่วยควบคุมแบบ PD
6. หน่วยควบคุมแบบ proportional-integral-derivative หรือเรียกง่าย ๆ ว่า หน่วยควบคุมแบบ PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กริยาการควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือแบบ on-off

ในระบบควบคุมแบบสองตำแหน่งนั้น ตัวกระทำจะทำงานในตำแหน่งที่คงที่เพียงสองตำแหน่งเท่านั้น ในบางครั้งจึงเรียกอย่างสั้น ๆ ว่า on-off การควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือแบบ on-off นี้จะเป็นการควบคุมแบบง่าย ๆ และราคาไม่แพง จึงนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานควบคุมทางอุตสาหกรรม

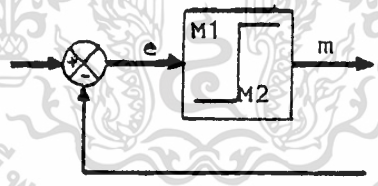
กำหนดให้สัญญาณเอาท์พุทของหน่วยควบคุมเป็น m(t) และสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนเป็น e(t) ดังนั้นในการควบคุมแบบสองตำแหน่ง สัญญาณ m(t) จะมีค่าอยู่เพียงค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุดเท่านั้น โดยขึ้นอยู่กับว่าสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเป็นบวกหรือเป็นลบ นั่นคือ

$$m(t) = M \quad \text{สำหรับ } e(t) > 0 \quad = -M \quad \text{สำหรับ } e(t) < 0$$

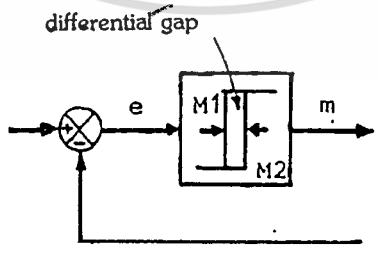
โดยที่ M และ -M เป็นค่าคงที

ค่าที่น้อยที่สุดของ M นั้นโดยทั่วไปจะมีค่าเป็นศูนย์มีค่าเท่ากับ -M หน่วยควบคุมแบบสองตำแหน่งนี้ส่วนใหญ่จะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่นิยมใช้กันมากได้แก่ solinoid valve แบบไฟฟ้า

รูปที่ 3. แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของหน่วยควบคุมแบบสองตำแหน่ง และสำหรับในเวลาที่ซึ่งสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลงไปก่อนเกิดการเปลี่ยนตำแหน่ง (switching) ของการควบคุมเรียกว่า differential gap ดังแสดงในรูปที่ 3.(ข) ช่วง differential gap นี้ เอาท์พุทของหน่วยควบคุม m(t) จะยังคงรักษาค่าเดิมอยู่จนกระทั่งสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยจากศูนย์



(ก)



(ข)

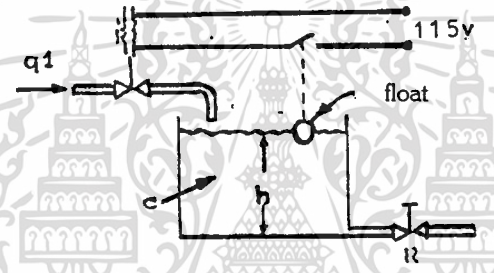
รูปที่ 3. บล็อกไดอะแกรมของหน่วยควบคุมแบบสองตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

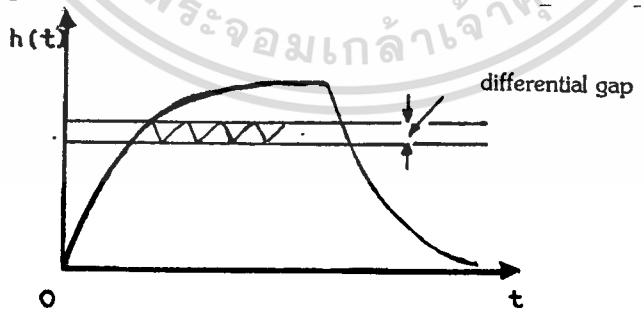
ในบางกรณี differential gap เป็นผลจากการเสียดทานที่ไม่ได้คาดคิดไว้ก่อน แต่ในบางครั้งก็ต้องทำให้มีช่วง differential gap เพื่อป้องกันการ on-off บ่อยเกินไป

พิจารณาระบบควบคุมระดับของของเหลวในรูปที่ 4. การควบคุมจะเป็นแบบ on-off นั่นก็คือวาล์วควบคุม (control valve) จะปิดหรือเปิดเท่านั้น อัตราการไหลเข้าของน้ำจึงมีค่าเป็นบวกคงที่หรือค่าศูนย์เพียงสองค่า สำหรับรูปที่ 5. แสดงถึงสัญญาณเอาท์พุทซึ่งเปลี่ยนแปลงไปอย่างต่อเนื่องภายในช่วงที่กำหนด และเป็นสาเหตุให้ตัวกระทำเปลี่ยนจากตำแหน่งหนึ่งไปสู่อีกตำแหน่งหนึ่ง รูปแบบของเอาท์พุท

ในรูปที่ 5. นี้เป็นคุณลักษณะโดยทั่ว ๆ ไปของผลตอบสนองของระบบที่มีการควบคุมแบบสองตำแหน่ง



รูปที่ 4. ระบบควบคุมระดับของของเหลว



รูปที่ 5. กราฟแสดงถึงผลตอบสนองของระบบควบคุมระดับของของเหลว ที่มีหน่วยควบคุมแบบสองตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5. จะเห็นได้ว่าขนาดของสัญญาณเอาท์พุทในช่วงที่เกิดการแกว่งนั้นสามารถจะทำให้มีค่าลดลงได้โดยการลดช่วงของ differential gap ซึ่งหมายถึงว่าจะทำให้จำนวนครั้งของการเปลี่ยนตำแหน่ง on-off ต่อนาทีมีจำนวนครั้งมากขึ้น ผลก็คือทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ลดลง ดังนั้นการพิจารณาถึงขนาดของช่วง differential gap จะต้องพิจารณาทั้งค่าของความเที่ยงตรงที่ต้องการ และอายุการใช้งานของอุปกรณ์ด้วย

กริยาการควบคุมแบบ proportional

สำหรับหน่วยควบคุมที่มีกริยาการควบคุมแบบ proportional นั้น ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุม (หรือเอาท์พุทของหน่วยควบคุม) m(t) กับสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน e(t) คือ

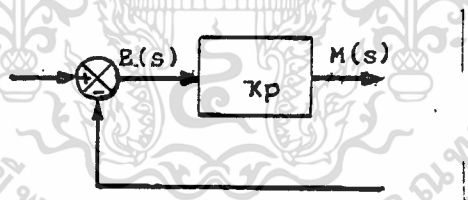
$$m(t) = Kp\, e(t)$$

หรือ

$$M(s)/E(s) = Kp$$

โดยที่ Kp จะอยู่ในเทอมของ proportional sensitivity หรือ gian

หน่วยควบคุมแบบ proportional ตัวขยาย (amplifier) ที่สามารถปรับค่าของ gain ได้ รูปที่ 6. แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของหน่วยควบคุมแบบ proportional ที่กล่าวมานี้



รูปที่ 6. แสดงบล็อกไดอะแกรมของหน่วยควบคุมแบบ Proportional

กริยาการควบคุมแบบ Integral

ในหน่วยควบคุมแบบ integral นั้น ค่าของเอาท์พุทของหน่วยควบคุม m(t) จะมีความสัมพันธ์กับค่าความคลาดเคลื่อน e(t) ดังนี้

$$dm(t)/dt = (1/Ti)\, e(t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ $$m(t) = (1/Ti) \int_0^t e(t)\, dt$$

โดยที่ Ti เป็นค่า integral time ที่สามารถปรับค่าได้

transfer function ของหน่วยควบคุมแบบ Integral คือ

$$M(s)/E(s) = (1/Ti)\, s$$
$$= Ki\, s$$

โดยที่ $Ki = 1/Ti$

กริยาการควบคุมแบบ integral นี้บางครั้งจะเรียกว่า reset control รูปที่ 7. เป็นบล็อกไดอะแกรมของหน่วยควบคุมแบบ integral

รูปที่ 7. แสดงบล็อกไดอะแกรมของหน่วยควบคุมแบบ integral

กริยาการควบคุมแบบ proportional-integral (PI)

กริยาการควบคุมแบบ proportional-integral นั้นสามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$m(t) = Kp\, e(t) + Kp/Ti \int e(t)dt$$
$$M(s)/E(s) = Kp(1 + (1/Ti)s)$$
$$= Kp(1 + Ki\, s)$$

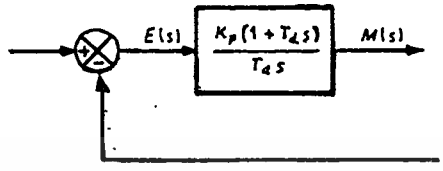
โดยที่ Kp เป็นค่าของ proportional sensitivity หรือ gain

Ti เป็นค่าของ integral time

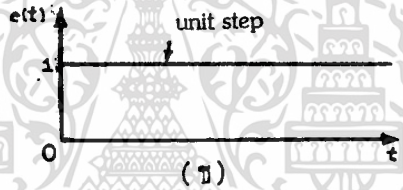
ทั้ง Kp และ Ti เป็นค่าที่ปรับได้ โดยที่การปรับ Ti นั้นจะเป็นการปรับกริยาการควบคุมแบบ integral ส่วนการปรับค่าของ Kp นั้นจะมีผลต่อส่วน proportional และส่วน integral

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

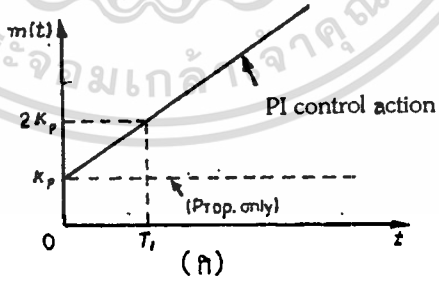
ของกริยาการควบคุม และค่าของส่วนกลับของ Ti นั้นจะเรียกว่า reset rate รูปที่ 8.(ก) แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของหน่วยควบคุมแบบ proportionaL-integral ถ้าสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน e(t) เป็นสัญญาณแบบ unit step ดังแสดงในรูปที่ 8.(ข) แล้ว สัญญาณค่าเอาท์พุทของหน่วยควบคุมแบบ PI จะแสดงดังรูปที่ 8.(ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 8. (ก) บล็อกไดอะแกรมของหน่วยควบคุมแบบ proportional - integral
(ข) อินพุทของหน่วยควบคุมซึ่งเป็นแบบ unit step
(ค) เอาท์พุทของหน่วยควบคุมแบบ PI เมื่ออินพุทเป็นแบบ unit step

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กริยาการควบคุมแบบ proportional derivative (PD)

กริยาการควบคุมแบบ proportional derivative นี้จะอยู่ในรูปของสมการ

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{d\,e(t)}{dt}$$

transfer function คือ

$$\frac{M(S)}{E(S)} = K_p(1 + T_d S)$$
$$= K_p(1 + K_d S)$$

โดยที่ K_p เป็นค่าของ proportional sensitivity หรือ gain

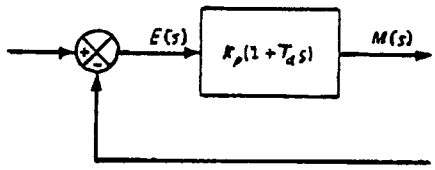
$T_d(K_d)$ เป็นค่าของ derivative time

ค่าของ K_p และ T_d นั้นจะเป็นค่าที่สามารถปรับได้ และในบางครั้งจะเรียกกริยาการควบคุมแบบ derivative ว่า rate control ทั้งนี้เพราะขนาดของสัญญาณเอาท์พุทของหน่วยควบคุม จะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน รูปที่ 9.(ก) แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของหน่วยควบคุมแบบ PD

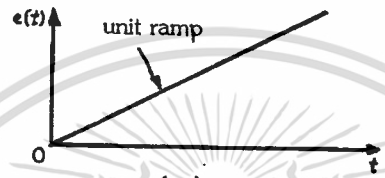
ถ้าสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน e(t) เป็น unit ramp ดังแสดงในรูปที่ 9.(ข) แล้ว สัญญาณเอาท์พุท m(t) ของหน่วยควบคุมแบบ PD จะเป็นดังรูปที่ 9.(ค) จากรูปที่ 9. จะเห็นว่ากริยาการควบคุมแบบ derivative มีคุณลักษณะของการคาดการณ์ล่วงหน้า โดยที่ Td จะเป็นช่วงเวลาซึ่งกริยาการควบคุมแบบ derivative ล้ำหน้าการควบคุมแบบ proportional แต่อย่างไรก็ตาม กริยาการควบคุมแบบ Derivative จะคาดการณ์ล่วงหน้าไม่ได้ถ้ากระทำนั้นยังไม่เกิดขึ้น

ถึงแม้ว่ากริยาการควบคุมแบบ derivative มีข้อดีคือ มีคุณลักษณะของการคาดการณ์ล่วงหน้า แต่มีข้อเสียคือจะขยายสัญญาณรบกวนและอาจจะเป็นสาเหตุให้เกิด saturation ในตัวกระทำได้ นอกจากนี้หน่วยควบคุมแบบ derivative ยังไม่สามารถจะใช้งานโดด ๆ ได้ เพราะกริยาการควบคุมจะมีผลเฉพาะในช่วงของ transient เท่านั้น

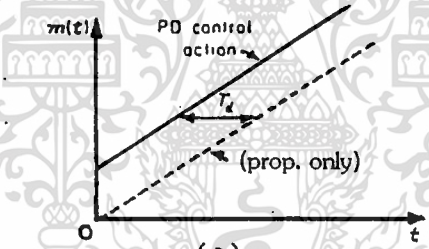
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 9 . (ก) บล็อกไดอะแกรมของหน่วยควบคุมแบบ PD
(ข) อินพุทของหน่วยควบคุมซึ่งเป็นแบบ unit ramp
(ค) เอาท์พุทของหน่วยควบคุมแบบ PD

กริยาการควบคุมแบบ proportional - integral - derivative (PID)

กริยาการควบคุมแบบ proportional - integral derivative หรือเรียกง่าย ๆ ว่า PID นั้น ได้จากการนำเอากริยาการควบคุมแบบ proportional กริยาการควบคุมแบบ integral และกริยาการควบคุมแบบ derivative เข้าด้วยกัน กริยาการควบคุมแบบ PID ของหน่วยควบคุมอัตโนมัตินี้ สามารถจะแสดงในรูปของสมการต่อไปนี้

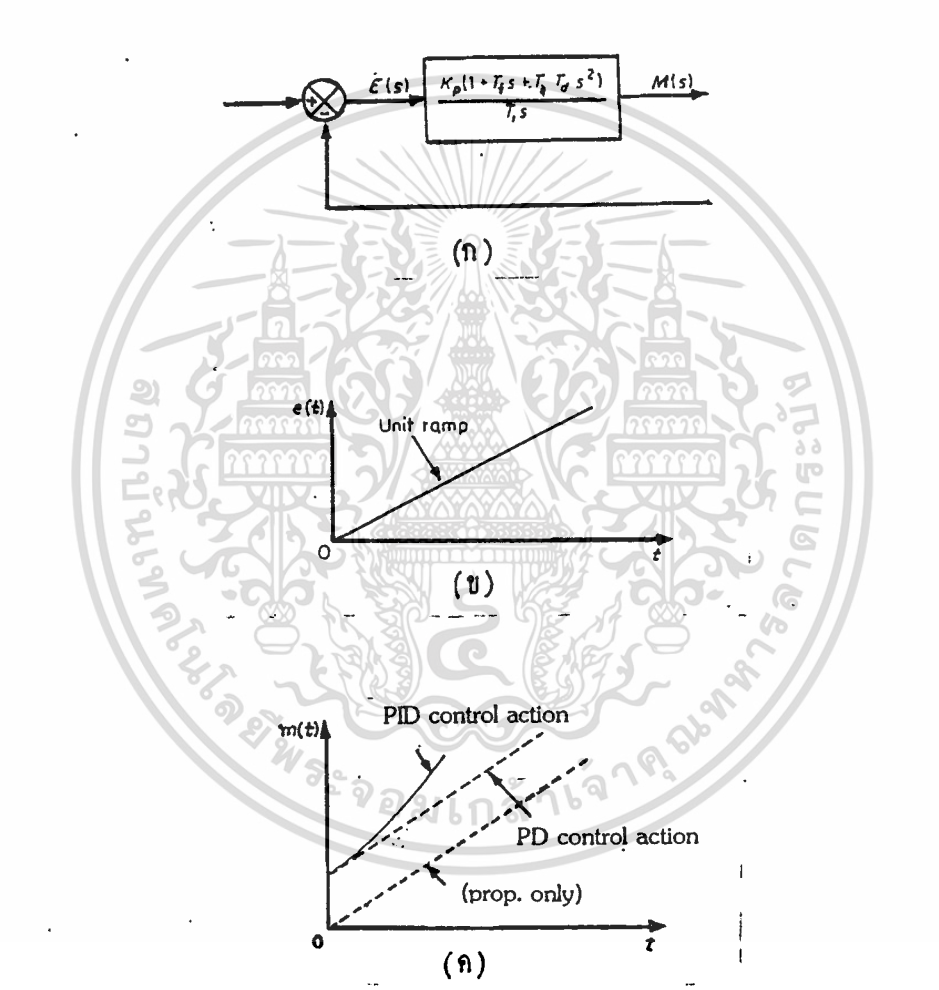
$$m(t) = Kp\, e(t) + KpTd\, de(t)/dt + Kp/Ti \int e(t)dt$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

transfer function คือ

$$M(s)/E(s) = Kp\,(\,1 + Td\,s + (1/Ti)s\,)$$
$$= Kp\,(\,1 + Kd\,s + Ki\,s\,)$$

บล็อกไดอะแกรมตลอดจนอินพุทและเอาท์พุทของหน่วยควบคุมแบบ PID จะแสดงดังรูปที่ 10.



รูปที่ 10. (ก) บล็อกไดอะแกรมของหน่วยควบคุมแบบ PID
(ข) สัญญาณอินพุทแบบ unit ramp
(ค) สัญญาณเอาท์พุทของหน่วยควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับค่าพารามิเตอร์ของหน่วยควบคุม

การปรับค่าพารามิเตอร์ของหน่วยควบคุม เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการควบคุมที่ดีที่สุด ในหัวข้อนี้จะได้แนะนำวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ของหน่วยควบคุมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดี วิธีการปรับค่ามีหลายวิธีแต่ไม่มีวิธีไหนเป็นที่ยอมรับว่าดีที่สุด กล่าวคือบางวิธีจะต้องพิจารณาผลตอบสนองของระบบและอาศัยประสบการณ์ในการปรับค่า ในขณะที่บางวิธีจะอาศัยคณิตศาสตร์ในการพิจารณา โดยทั่วไปแล้วการปรับค่าพารามิเตอร์ของหน่วยควบคุมจะพิจารณาจากเงื่อนไขในโดเมนเวลา (time domain) มากกว่าเงื่อนไขในโดเมนความถี่ (frequency domain) ซึ่งจะอยู่ในรูปของ gain margin และ phase margin เงื่อนไขในโดเมนเวลาที่นิยมใช้เพื่อการปรับค่ามีดังต่อไปนี้

1. อัตราการเสื่อม 1/4 (quater decay) กล่าวคือ peak overshood อันที่สองต่อ peak overshood อันแรก (maximum overshood) ของผลตอบสนองของระบบที่มีการแกว่งจะต้องมีค่าเท่ากับ 1/4 รูปที่ 11. แสดงถึงเงื่อนไขนี้

2. ดัชนีแสดงสมรรถนะแบบ integral of square error (ISE) ที่มีค่าน้อยที่สุด ดัชนีแสดงสมรรถนะแบบนี้แสดงได้ด้วยสมการ

$$ISE = \int_0^\infty [e(t)^2]\, dt = \text{น้อยที่สุด}$$

โดยที่ $e(t)$ = ค่าความคลาดเคลื่อน = $r(t) - c(t)$

3. ดัชนีแสดงสมรรถนะแบบ integral of absolute error (IAE) ที่มีค่าน้อยที่สุด สมการของดัชนีแสดงสมรรถนะแบบนี้คือ

$$IAE = \int_0^\infty [e(t)]\, dt = \text{น้อยที่สุด}$$

4. ดัชนีแสดงสมรรถนะแบบ integral of time multiplied absolute error (ITAE) ที่มีค่าน้อยที่สุด นั่นคือ

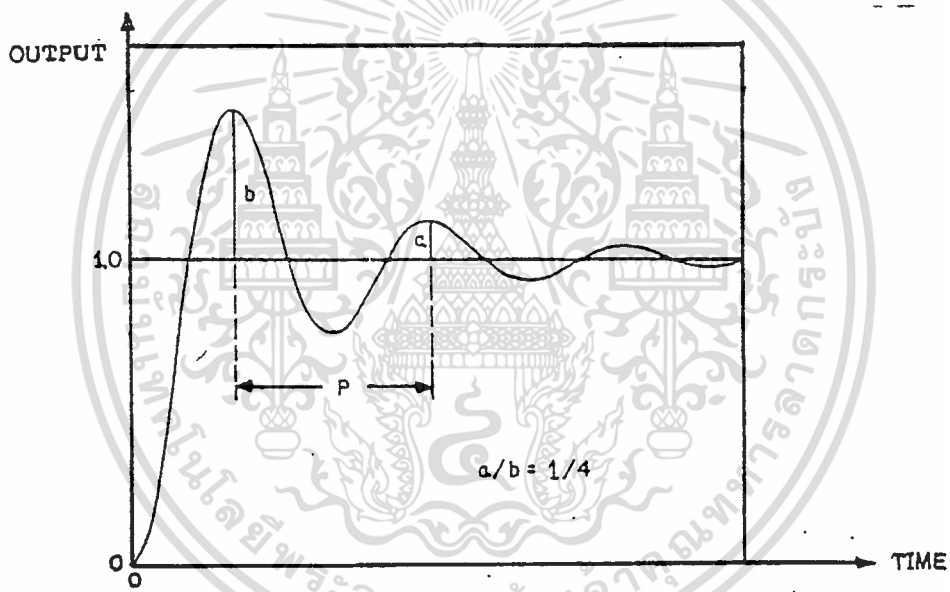
$$ITAE = \int_0^\infty t\ e(t)\, dt = \text{น้อยที่สุด}$$

เงื่อนไขทั้งสี่แบบที่กล่าวมานี้ แบบแรกจะเป็นแบบที่สะดวกเพราะสามารถวัดได้จากผลตอบสนองของระบบโดยตรง ส่วนแบบที่สองถึงแบบที่สี่มีข้อดีคือ จะมีความแม่นยำสูงกว่าแบบแรก กล่าวคือค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหน่วยควบคุมอาจจะมีหลายค่าที่ทำให้ผลตอบสนองมีอัตราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสื่อม 1/4 แต่จะมีเพียงค่าเดียวที่ทำให้เงื่อนไขแบบที่สองหรือแบบที่สามหรือแบบที่สี่มีค่าน้อยสุด

เงื่อนไขแบบอัตราการเสื่อมแบบ 1/4 นั้นจะเงื่อนไขที่ดีในการประนีประนอมระหว่าง rise time ที่เร็วและ settling time ที่น้อย สำหรับเงื่อนไขแบบที่สองถึงแบบที่สี่นั้น เนื่องจากว่าผลตอบสนองของระบบแต่ละระบบจะไม่เหมือนกัน ดังนั้นค่าของดัชนีแสดงสมรรถนะแต่ละแบบก็จะเปลี่ยนแปลงตามระบบด้วย แต่คุณลักษณะโดยทั่วไปของดัชนีแต่ละแบบนั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ เงื่อนไขแบบที่สองซึ่งเป็นดัชนีแสดงสมรรถนะแบบ ISE นั้น ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมาก ค่าของดัชนีแสดงสมรรถนะก็จะมาก ดังนั้นการทำให้ดัชนีแสดงสมรรถนะแบบนี้มีค่าน้อยที่สุดก็คือ ผลตอบสนองของระบบจะต้องมี rise time ที่น้อยมาก ซึ่งทำให้มีข้อเสียคือมี overshoot ที่สูง สำหรับเงื่อนไขแบบ ITAE ซึ่งเป็นค่าของเวลาคูณกับค่าความคลาดเคลื่อนนั้น ถ้าต้องการทำให้มีค่าน้อยที่สุดแล้ว ผลตอบสนองของระบบจะต้องมี settling time ที่น้อย และมีอัตราการหน่วงสูง ส่วนเงื่อนไขแบบ IAE จะมีคุณลักษณะใกล้เคียงกับเงื่อนไขแบบอัตราเสื่อม 1/4



รูปที่ 11. แสดงผลตอบสนองของระบบที่มีอัตราการเสื่อม 1/4

วิธีการของผลตอบสนองของระบบแบบลูปปิด

เทคนิคในการปรับค่าพารามิเตอร์ขลงหน่วยควบคุมนั้นสามารถจะทำได้สองแบบคือ แบบแรกจะเป็นการปรับค่า โดยจะพิจารณาจากผลตอบสนองของระบบลูปปิด ซึ่งมีวิธีการปรับค่าอยู่สองสามวิธี แบบที่สอลจะเป็นการปรับค่าโดยพิจารณาจากกราฟผลตอบสนองของระบบแบบลูปเปิด ซึ่งโดยทั่วไปเรียกว่า process reaction curve วิธีการปรับค่าโดยพิจารณาจากผลตอบสนองของระบบแบบลูปปิดนั้น หน่วยควบคุมจะถูกใส่ไว้ในระบบตั้งแต่ตอนแรก สำหรับแบบที่สองหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือแบบ process reaction curve นั้นหน่วยควบคุมจะถูกนำมาใส่ในระบบหลังจากที่หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหน่วยควบคุมได้แล้ว

วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของหน่วยควบคุมสำหรับระบบแบบลูปปิด นิยมใช้กันอยู่สองวิธีคือ วิธี ultimate method และวิธี damped oscillation method

1. ultimate method

วิธีการปรับค่าแบบ ultimate method นั้นคิดค้นโดย Ziegler และ Nichols ในปี 1942 ที่เรียกว่า ultimate เพราะว่าวิธีนี้จะใช้ ultimate gain ซึ่งเป็นค่า gain สูงสุดก่อนที่ระบบจะไม่เสถียรภาพ และ ultimate period ซึ่งเป็นคาบเวลาสุดท้ายของผลตอบสนองของระบบก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะไม่เสถียรภาพ (นั่นคือคาบเวลาของผลตอบสนองของระบบภายใต้ค่า gain สูงสุดนั่นเอง) มาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของหน่วยควบคุม รูปที่ 12. แสดงถึงผลตอบสนองของระบบแบบลูปปิดที่มีการควบคุมแบบ proportional โดยที่ค่า Ku คือ ultimate gain ที่ทำให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง และ Pu คือ ultimate period

ในการหาค่าของ Ku และ Pu นั้นจะทำดังนี้คือ ให้ปรับค่า gain Kp ของหน่วยควบคุมแบบ PID (โดยให้ค่าของ Ti เป็นอินฟินิตี้และ Td เป็นศูนย์ ซึ่งก็หมายถึงว่าระบบนั้นอยู่ภายใต้การควบคุมแบบ proportional นั่นเอง) จนทำให้ผลตอบสนองของระบบแบบลูปปิดนั้น ๆ เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องกันไป ดังแสดงในรูปที่ 12. ค่าของ gain Kp ที่ทำให้ผลตอบสนองของระบบแบบลูปปิดเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องกันไปก็คือค่า gain Ku และคาบเวลาของการแกว่งก็คือ Pu

Ziegler และ Nichols ได้กำหนดความสัมพันธ์ในการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหน่วยควบคุมแต่ละแบบดังนี้

1. หน่วยควบคุมแบบ proportional (P)

$$Kp = 0.5\ Ku$$

2. หน่วยควบคุมแบบ proportional-integral (PI)

$$Kp = 0.45\ Ku$$

$$Ti = Pu/1.2$$

3. หน่วยควบคุมแบบ proportional-derivative (PD)

$$Kp = 0.6\ Ku$$

$$Td = Pu/8$$

4. หน่วยควบคุมแบบ proportional-integral-derivative (PID)

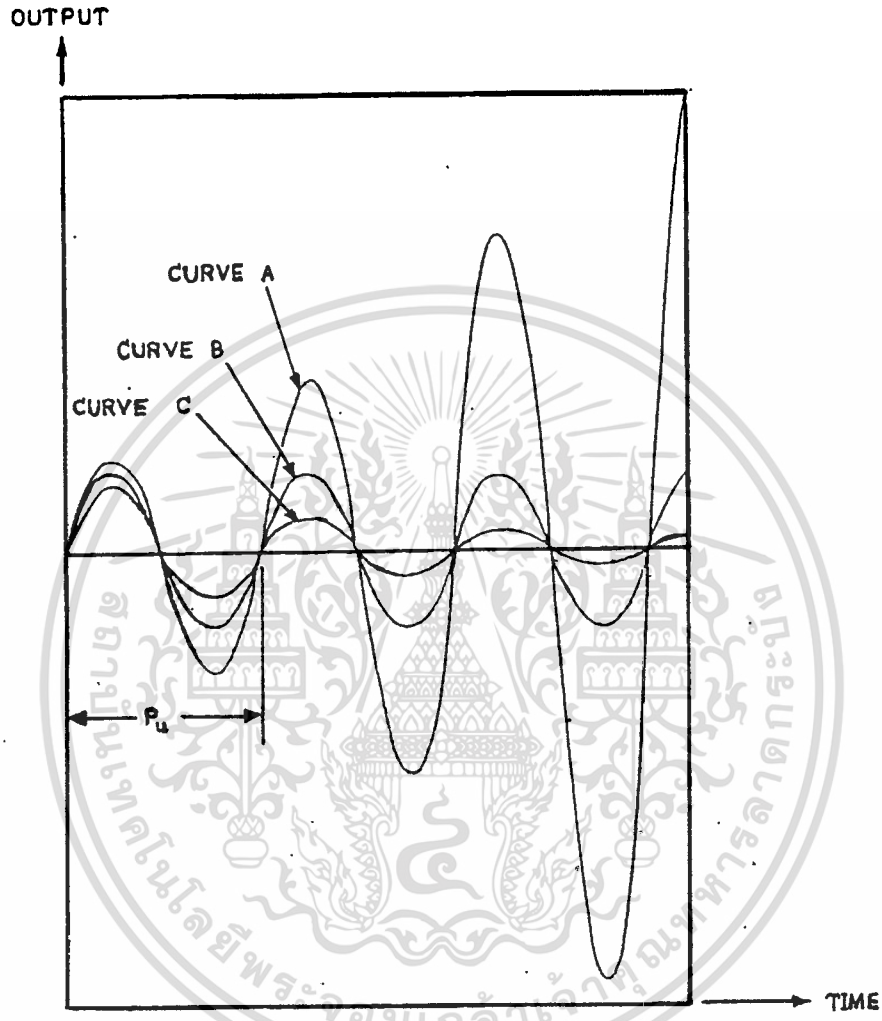
$$Kp = 0.6\ Ku$$

$$Ti = 0.5\ Pu$$

$$Td = Pu/8$$

ค่าต่าง ๆ เหล่านี้จะทำให้ผลตอบสนองของระบบมีอัตราการเสื่อม 1/4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12. แสดงผลตอบสนองของระบบแบบลูปปิดเพื่อใช้ในการหาค่าของ Ku และ Pu โดย

Curve A นั้นระบบจะไม่เสถียรภาพ

Curve B ผลตอบสนองของระบบเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง

Curve C ผลตอบสนองของระบบที่มีเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. damped oscillation method

วิธี damped osillation นั้นได้รับการปรับปรุงแก้ไขมาจากแบบ ultimate method โดย Harriott กล่าวคือ ในกรณีของระบบที่ถึงแม้ว่าจะปรับค่าของ gain ไปอย่างไรก็ตาม ผลตอบสนองของระบบก็ไม่เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องกัน จึงไม่สามารถใช้วิธีแบบ ultimate method ได้ ดังนั้น Harriott จึงได้คิดค้นวิธี damped oscillation ขึ้นเพื่อใช้กับระบบแบบลูปปิดที่ใช้วิธี ultimate method ไม่ได้ วิธี damped oscillation นั้นทำได้ดังนี้คือ ปรับค่า gain Kp ของหน่วยควบคุม Proportional จนผลตอบสนองของระบบแบบลูปปิดมีอัตราการเสื่อม 1/4 และวัดช่วงของ P (ดังแสดงในรูปที่ 11.) จากค่าของ P จะสามารถหาค่าของ Ti และ Td ได้ดังนี้

$$Ti = P/1.5$$

$$Td = P/6$$

เมื่อได้ค่าของ Ti และ Td แล้ว ต้องทำการปรับค่า gain Kp ของระบบแบบลูปปิดที่มีหน่วยควบคุมแบบ PID ใหม่ จนกระทั่งผลตอบสนองของระบบมีอัตราการเสื่อม 1/4

ข้อเสียของวิธีการของระบบแบบลูปปิดทั้งสองวิธีที่กล่าวมานี้ ที่มองเห็นได้ชัดคือ วิธีทั้งสองเป็นวิธีการลองผิดลองถูก (trial and error) ซึ่งต้องใช้เวลามากพอสมควรในการหาค่าของ gain Ku ที่ทำให้ผลตอบสนองของระบบเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องกันไป หรือค่าของ Ga ที่ทำให้ผลตอบสนองของระบบมีอัตราการเสื่อม 1/4 อนึ่งอินพุทที่ป้อนให้กับระบบแบบลูปปิดเพื่อทำการหาค่าของหน่วยควบคุมนี้จะเป็นอินพุทแบบ unit step ตารางที่ 1. จะสรุปถึงการกำหนดค่าต่าง ๆ ของหน่วยควบคุมจากวิธีของผลตอบสนองของระบบแบบลูปปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ชนิดของหน่วยควบคุม	ค่าที่กำหนด
ultimate method	P	Kp = 0.5 Ku
(Zieler-Nichols)	PI	Kp = 0.45 Ku
		Ti = Pu/1.2
	PD	Kp = 0.6 Ku
		Td = Pu/8
	PID	Kp = 0.6 Ku
		Ti = 0.5 Pu
		Td = Pu/8
damped oscillation Method (Harriott)	PID	Kp = ค่า Gain ที่ทำให้ อัตราการเสื่อม = 1/4
		Ti = P/1.5
		Td = P/6

ตารางที่ 1. การกำหนดค่าต่าง ๆ ของหน่วยควบคุมจากวิธีของผลตอบสนองของระบบแบบลูปิด

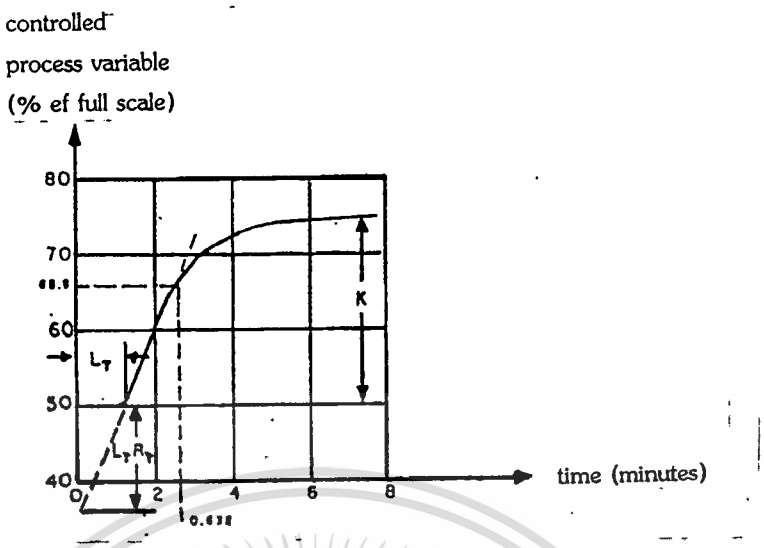
หมายเหตุ 1. ค่า Ku คือค่า Gain ที่ทำให้ผลตอบสนองของระบบแบบลูปปิดภายใต้การควบคุมแบบ proportional เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง

2. ค่า Pu และ P นั้นอ้างตามรูปที่ 11. ตามลำดับ

process reaction curve

วิธีการแบบ process reaction curve นี้ หน่วยการควบคุมจะไม่ได้ต่ออยู่กับระบบที่ทำการทดสอบ ดังนั้นวิธีนี้ก็คือการหาคุณลักษณะ (characteristic) ของระบบนั่นเอง จากนั้นจึงค่อยทำการหาค่าพารามิเตอร์ของหน่วยควบคุมจากคุณลักษณะของระบบโดยจะใช้วิธีการประมาณค่าจาก process reaction curve ซึ่งเป็นผลตอบสนองของระบบที่ทำการทดสอบโดยที่ อินพุทของระบบเป็น Unit Step วิธีการของระบบแบบลูปเปิดนี้จะง่ายกว่าวิธีของระบบแบบลูปปิด รูปที่ 13. แสดงถึง process reaction curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13. แสดง process reaction curve

process reaction curve นี้จะถูกประมาณด้วย first order lag บวกกับ time delay ขั้นแรกให้รากเส้นตรงสัมผัสกับจุดที่มีการเบี่ยงเบนสูงสุด (จุดเบี่ยงเบน) ซึ่งอาจจะเห็นว่าจุดนี้หาได้ง่าย แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก และอาจจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้โดยง่าย จึงต้องระมัดระวังให้ดีในการลากเส้นสัมผัสนี้ ความชันของเส้นสัมผัสจะกำหนดให้เป็น reaction rate Rr ส่วน Lr เป็น dead time หรือ delay time ของ process reaction curve สำหรับค่าของ gain K นั้นจะหาได้จากสมการต่อไปนี้

K = ค่าของเอาท์พุทของระบบที่ภาวะคงที่ ขนาดของอินพุทของระบบ

ค่าของ time delay และค่า time constant ของ first order lag คือ

time delay To = tr

time constant T = K/Rr

วิธีการประมาณค่าของ time delay และค่า time constant อีกวิธีหนึ่งสามารถจะทำได้ การหาค่าของเวลาที่ process reaction curve มีค่า 63.2 % ของค่าสุดท้าย จากนั้นค่าของ time delay และ time constant ของ first order lag จากสมการข้างล่างนี้

time delay To = Lr

time constant T = K/Rr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการประมาณค่าของ time delay และค่า time constant อีกวิธีหนึ่งสามารถจะทำได้โดยการหาค่าของเวลาที่ process reaction curve มีค่า 63.2 % ของค่าสุดท้าย จากนั้นหาค่าของ time delay และ time constant ของ first oder lag จากสมการข้างล่างนี้

time delay To = Lr

time constant T = t(0.632) - t(0)

โดยที่ t(0.632) คือเวลาที่ process reaction curve มีค่าเท่ากับ 63.2 % ของค่าสุดท้าย

Studies ได้พบว่าการประมาณค่า time constant ของ first order lag จากค่า t(0.632) นั้นเป็นการประมาณค่าที่ดีกว่าการหาจากสมการที่ 28.

Ziegler และ Nichols ได้กำหนดความสัมพันธ์ในการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหน่วยควบคุมจากค่าของ Rr และ Lr ดังนี้

1. หน่วยควบคุมแบบ proportional (P)

Kp = 1/LrRr

2. หน่วยควบคุมแบบ proportional-integral (PI)

Kp = 0.9/LrRr

Ti = 3.33 Lr

3. หน่วยควบคุมแบบ proportional-integral-derivative (PID)

Kp = 1.2/LrRr

Ti = 2.0 Lr

d = 0.5 Lr

ต่อมา Cohen และ Coon ได้เสนอวิธีการแห่งการกำหนดค่าอีกวิธีหนึ่งดังนี้

1. หน่วยควบคุมแบบ proportional (P)

Kp = (1+u/3) / (RrLr)

2. หน่วยควบคุมแบบ proportional-integral (PI)

Kp = 0.9(1+u/11) / (RrLr)

Ti = 3.33 Lr(1+u/11) / (1+11u/5)

3. หน่วยควบคุมแบบ proportional-integral-derivative (PID)

Kp = 1.35(1+u/5) / (RrLr)

Ti = 2.5 Lr(1+u/5) / (1+3u/5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Td = 0.37\ Lr\ /\ (1+u/5)$$

โดยที่ $u = RrLr\ /\ K$

เงื่อนไขของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหน่วยควบคุมแต่ละแบบที่ได้คิดขึ้นนั้นโดย Ziegler และ Nichols หรือ Cohen และ Coon นั้นก็คือจะทำให้ผลตอบสนองของระบบที่ถูกควบคุมมีอัตราการเสื่อม 1/4

ตารางที่ 2. จะสรุปถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหน่วยควบคุมแต่ละแบบที่ถูกกำหนดโดย Ziegler-Nichols และ Cohen-Coon จากวิธีของ process reaction curve

หน่วยควบคุม	Ziegler-Nichols	Cohen-Coon
P	$Kp = 1/LrRr$	$Kp = (1+u/3)\ /\ (RrLr)$
PI	$Kp = 0.9/LrRr$	$Kp = 0.9(1+u/11)\ /\ (RrLr)$
	$Ti = 3.33\ Lr$	$Ti = 3.33Lr(1+u/11)\ /\ (1+11u/5)$
PID	$Kp = 1.2/LrRr$	$Kp = 1.35(1+u/5)\ /\ (RrLr)$
	$Ti = 2.0\ Lr$	$Ti = 2.5\ Lr(1+u/5)\ /\ (1+3u/5)$
	$Td = 0.5\ Lr$	$Ld = 0.37\ Lr\ /\ (1+u/5)$

หมายเหตุ 1. ค่าของ Lr , Rr อ้างตามรูปที่ 13.

ตารางที่ 2. ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหน่วยควบคุมที่ถูกกำหนดจากวิธีของ process reaction curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Instruction Manual

UT37/UT38
Digital Indicating Controller
Initial Setting Manual

CONTENTS

1. HANDLING PRECAUTIONS 2
   1.1 Confirmation of Specifications and Accessories 3
   1.2 Structure and Function 4
   1.3 Confirmation of Measurement Input Range Code and Control Output Type Code 5
   1.4 Before Beginning Operation 6
2. HOW TO CHANGE INPUT/OUTPUT TYPE 7
   2.1 How to Change the Input Range Code 8
   2.2 How to Change the Control Output Type Code (only for UT37) 10
3. VARIOUS SETTING AND MODE SELECTION USING DIP SWITCH 11
   3.1 Setting of Control Output Value for Abnormality 11
   3.2 Setting of Secondary Setpoint (2.SP) 11
   3.3 Selection of Operation/Setup Parameter Setting Mode 12
4. MOUNTING 13
   4.1 Mounting Location 13
   4.2 Installation Procedure 13
   4.3 External Dimensions and Panel Cut Dimensions 14
5. WIRING 16
   5.1 How to Wire 16
   5.2 Cautions 17
   5.3 Terminal Wiring Diagram 18
6. FRONT PANEL DISPLAY PANELS AND CONTROL KEYS 22
7. KEY OPERATION 24
8. OPERATION PARAMETERS 26
   8.1 Operation Parameter Setting Flow 26
   8.2 Operation Parameter List 28
   8.3 Description of Operation Parameters 30
9. SETUP PARAMETERS 36
   9.1 Setup Parameter Setting Flow 36
   9.2 Setup Parameter List 38
   9.3 Description of Setup Parameters 42
      9.3.1 Parameters for Key Lock 42
      9.3.2 Parameters for Measured Input 43
      9.3.3 Parameters for Remote Setting Input 41
      9.3.4 Parameters for Target Setpoint (SP) 44
      9.3.5 Control Parameters 48
      9.3.6 Parameters for Retransmission Output and Alarm 51
      9.3.7 Valve Calibration Parameters (Only for UT38) 54
10. OTHER FUNCTIONS 55
   10.1 Coordinated Operation 55
   10.2 Transmitter Loop Power Supply 56
11. STANDARD SPECIFICATIONS 57

YOKOGAWA
Yokogawa Electric Corporation

IM 5B4B7-01E
1993. June. 2nd Edition

1. HANDLING PRECAUTIONS

The controller comes with two instruction manuals for your reference: This Initial Setting Manual and the separate Operation Manual.

Initial Setting Manual

- ◎ Handling Precautions
- ◎ How to change input/output type
- ◎ Mounting
- ◎ Wiring
- ◎ Front panel displays and control keys
- ◎ Parameter lists and description
- ◎ Cooperated operation (General)
- ◎ Specifications

Operation Manual

- ◎ Cautions
- ◎ Key operation
  - ● Setting Setpoint
  - ● Setting operation parameters
    - • Alarm values
    - • PID constants and others.
  - ● Operation
    - • Run/Stop
    - • Mode selection and others
- ◎ Maintenance and Countermeasures against abnormality

For details, see the table of contents.

1.1 Confirmation of Specifications and Accessories

Confirm that the delivered controller has the same model and suffix codes specified in ordering.

Model and Codes

Model	Suffix Code		Description
UT37	.....		Digital Indicating Controller (Continuous/Time-Proportional PID Output Type)
UT38	.....		Digital Indicating Controller (Position-Proportional PID Output Type)
Optional codes		/RET	Retransmission Output Signal (4 to 20 mA DC)
		/RSP	Remote Setting Input
		/RS422	RS-422A Communication Interface
		/LPS	Transmitter Loop Power Supply

Confirm that the following items are all properly included.

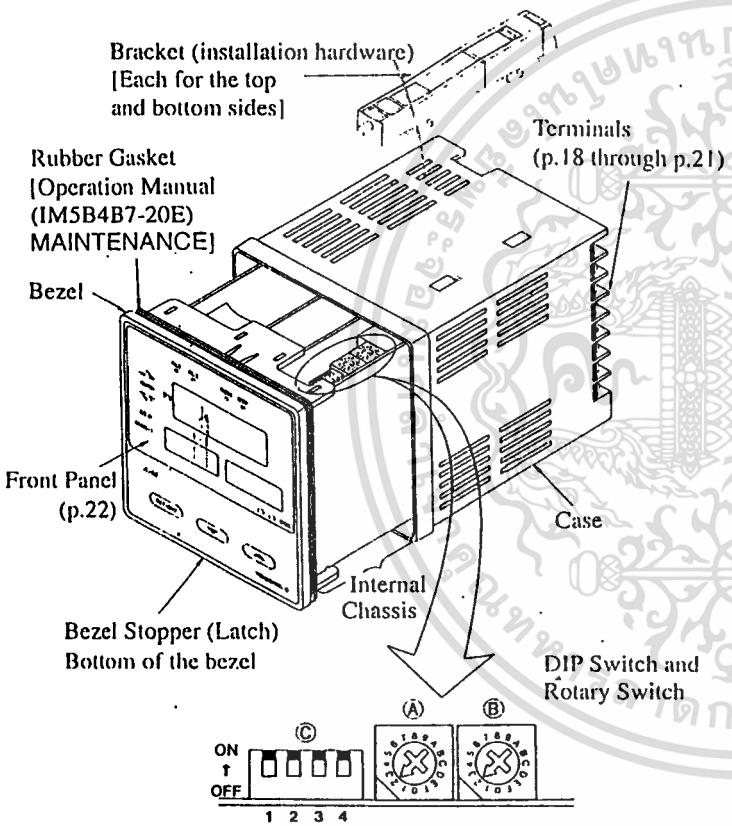
- UT37 or UT38 controller 1
- Bracket (for mounting) 2
- Unit label 1
- Instruction Manual: Initial Setting Manual 1
- Instruction Manual: Operation Manual 1
- Instruction Manual: Communication Manual 1*

* This item is included only when the optional code /RS422 is specified.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 Structure and Function

- UT37 or UT38 is made up as the below.



1.3 Confirmation of Input Range Code and Control Output Type Code

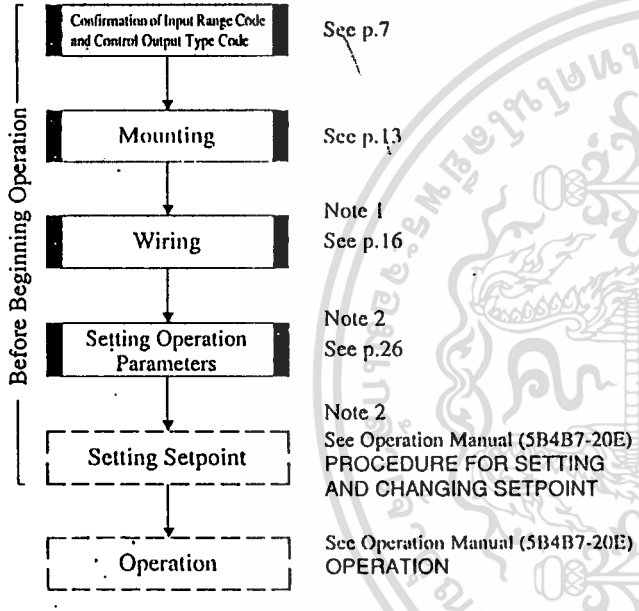
- Unless otherwise specified, UT37/UT38 is shipped from the factory with the following input range code and control output type code set.

	Input range code	Control Output type code
UT37	0 (TC: Type K, −200 to 1200°C) DIP switch No.1: ON	0 (Time-proportional PID/relay output)
UT38	0 (TC: Type K, −200 to 1200°C) DIP switch No.1: ON	Position-proportional PID output (No change of type is allowed.)

- The controller is also shipped from the factory with the control action set to reverse action.
- If any input/output type change is required for operation, see "2. How to Change Input/Output Type."

1.4 Before Beginning Operation

Prepare for use according to the flow chart below.



Note 1: This instrument itself has no power switch. It will begin to operate and generate a control output as soon as power is supplied to it. We recommend that the device to be controlled not be connected until immediately before operation is to begin.

Note 2: The parameters and setpoint (SP) for this instrument will be set when shipped from the factory as described in Operation Parameter List.

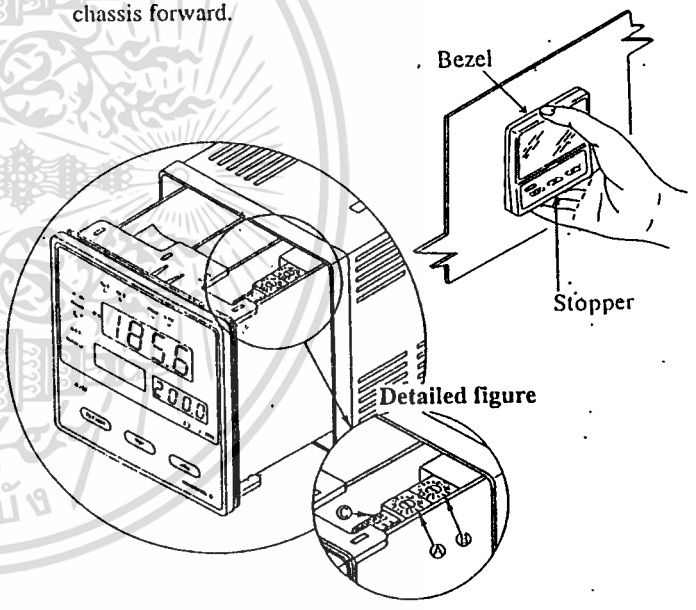
2. HOW TO CHANGE INPUT/OUTPUT TYPE

In the UT37/UT38, the measurement input range code and the control output type code can be changed using a switch provided in the internal assembly.

Draw out the internal chassis, following the procedure described below:

① Turn OFF UT37/UT38 power.

② Pressing the stopper at the bezel bottom, pull the internal chassis forward.

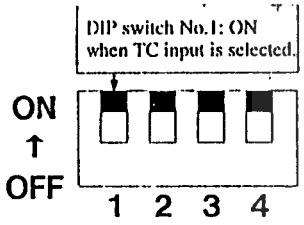


Note: After changing is completed, insert the chassis into the case and then turn ON power.

2.1 How to Change the Input Range Code.

Change the input range code using the DIP switch No.1 and rotary switch Ⓐ (p.7)

Use a jeweler's screwdriver (precision screwdriver) to set the arrow mark on the rotary switch Ⓐ to the desired input range code No. (Unless otherwise specified, the input range code is preset to "TC: Type K, –200 to 1200°C" on shipment.)



To select the thermocouple (TC) input type, set No.1 DIP switch to ON.

Table 1. Thermocouple Input Range Code

TC Type	Instrument range		DIP Switch No.1	Input Range Code (Note 1)
K	-200~1200°C	-300~2300°F	ON	0
K	-199.9~999.9°C	0~2300°F		1
K	-199.9~500.0°C	-199.9~999.9°F		2
J	-199.9~800.0°C	-300~ 1500°F		3
T	-199.9~400.0°C	-199.9~750.0°F		4
T	0.0~400.0°C	-300~ 750°F		5
T	-199.9~200.0°C	-199.9~400.0°F		6
B	0~ 1800°C	32~ 3300°F		7
S	0~ 1700°C	32~ 3100°F		8
R	0~ 1700°C	32~ 3100°F		9
N	0~ 1300°C	32~ 2400°F		A
W	0~ 2300°C	32~ 4200°F		B
E	-199.9~800.0°C	-300~ 1500°F		C
L	-199.9~800.0°C	-300~ 1500°F		D
U	-199.9~400.0°C	-300~ 750°F		E
U	0.0~400.0°C	-199.9~750.0°F		F

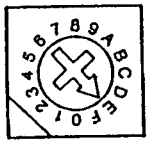
Note 1:
Set the arrow mark on the rotary switch Ⓐ to the desired input range code No. (In the above illustration, Type J thermocouple is selected.)

To select the resistance temperature detector (RTD)/direct current voltage (DCV) input type, set No.1 switch to OFF.

To select RTD/DCV input type, set Dip switch No.1 to OFF.

Table 2. RTD/DCV Input Range Code

RTD/ DCV Type	Instrument range		DIP Switch No.1	Input Range Code (Note 2)
JPt100	-199.9~500.0°C	-199.9~999.9°F	OFF	0
	0.0~200.0°C	32.0~400.0°F		1
	0.0~100.0°C	32.0~200.0°F		2
	-100.0~100.0°C	-199.9~200.0°F		3
Pt100	-199.9~640.0°C	-300~ 1180°F		4
	-199.9~500.0°C	-199.9~999.9°F		5
	0.0~200.0°C	32.0~400.0°F		6
	0.0~100.0°C	32.0~200.0°F		7
	-100.0~100.0°C	-199.9~200.0°F		8
-10~10mV	Scaling available in the following four ranges. -1999 ~ 9999 -199.9 ~ 999.9 -19.99 ~ 99.99 -1.999 ~ 9.999 (Decimal point position can be changed.)			9
0~10mV				A
0~100mV				B
0~1V				C
0~5V				D
1~5V				E
0~10V				F



Note 2:
Set the arrow mark on the rotary switch Ⓐ to the desired input range code No. (In the above illustration, "DC voltage: 1 to 5V" is selected.)

Note: After changing is completed, insert the chassis into the case and then turn ON power.
Set to °C or °F the engineering unit by the parameter: UNI (Setup parameter for measured input)

2.2 How to Change the Control Output Type Code (Only for UT37)

To change the control output type code, set the arrow mark on the rotary switch (B) to the desired control output type code No. using a jeweler's screwdriver. (Unless otherwise specified, the control output type code is preset to "Time-proportional PID (relay) output" on shipment.)

Set the arrow mark on the rotary switch (B) to the desired control output type code No. (In this illustration, the continuous output PID is specified.)

Control output type	Specifications	Control output type code
Time-proportional PID (relay) output (Note 1)	Contact capacity: 250V AC, 3A (resistive load) Cycle time: 1 to 240 sec (selectable)	0
Time-proportional PID (voltage pulse) output	ON voltage: Approx. 12V DC or more OFF voltage: 0.1V DC or less (load resistance: 600Ω or more) Cycle time: 1 to 240 sec (selectable)	1
Continuous PID output	Output current: 4 to 20mA DC (Load resistance: 600Ω or less) Accuracy: ±0.3% (of output span) Output update period: 200ms	2
ON/OFF relay output (Note 1)	Contact rating: 250V AC, 3A (resistive load) Output update period: 200ms	3

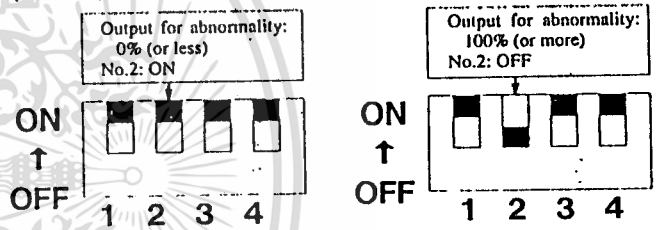
Note 1: If the control output relay deteriorates it should be replaced. The UT37 and UT38 use DSP1-DC12V relays (Matsushita Electric). They may be ordered from your YOKOGAWA SALES REPRESENTATIVE or MATSUSHITA ELECTRIC OFFICES.

3. VARIOUS SETTING AND MODE SELECTION USING DIP SWITCH

The DIP switch is provided on the internal chassis. (For how to draw out the assembly, see p.7. All DIP switch are preset to ON on shipment.)

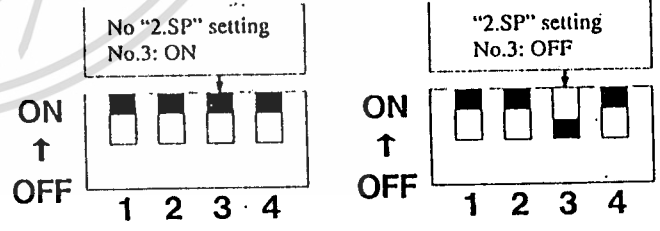
3.1 Setting of Control Output Value for Abnormality (Refer to IM5B4B7-20E, chapter 7)

To set the output value for abnormality to 0% (or less) or 100% (or more), turn ON or OFF DIP switch No.2.



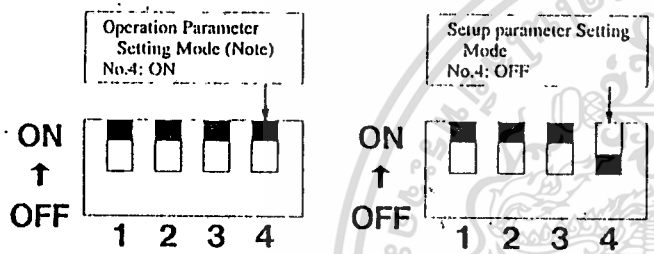
3.2 Setting of Secondary Setpoint (2.SP)

To set the secondary setpoint (2.SP), turn OFF DIP switch No.3. When DIP switch No.3 remains set to ON, the secondary setpoint cannot be setup. (When "2.SP" setting mode is selected, the operation parameter setting items exclusive to "2.SP" must be additionally set. See p.29.)



3.3 Selection of Operation/Setup Parameter Setting Mode

To select the operation parameter setting mode, turn ON DIP switch No.4. To select the setup parameter setting mode, turn OFF DIP switch No.4.



Note: To call up the selected operation parameter setting mode, press the (SET/ENT) key for three sec or more on the operation display panel. (See p.24)

4. MOUNTING

4.1 Mounting Location

To mount the controller, select a location as described below, where:

(1) There is no mechanical vibration.
(2) No corrosive gases are present.
(3) Temperature is near the room temperature (23°C) and of low variation.
(4) The controller is not subject to strong direct radiant heat.
(5) The controller is not affected by electromagnetic fields.
(6) The controller is not exposed to water splash or rain fall.

4.2 Installation Procedure

(1) Insert this controller into the panel cutout from the front of the panel.
(2) Mount the controller to the panel using the attached mounting brackets. When mounting, never fasten the brackets too tightly.

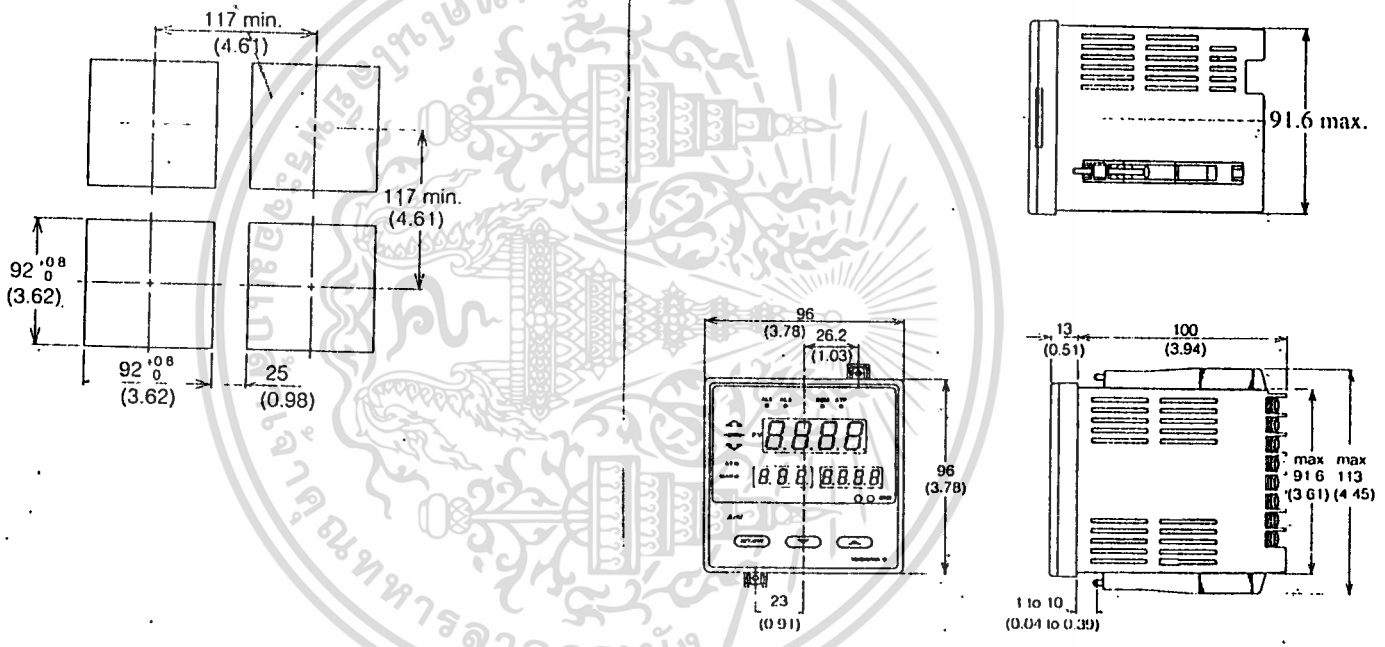
CAUTION

CAUTION: WHEN MOUNTING ON OR OVER A COMBUSTIBLE SURFACE, A PLATE OF AT LEAST 1.43mm GALVANIZED OR 1.6mm UNCOATED STEEL EXTENDED AT LEAST 150mm BEYOND THE EQUIPMENT ON ALL SIDES MUST BE INSTALLED
and
AVERTISSEMENT: LORSQUE L'APPAREIL EST INSTALLÉ SUR OU AU-DESSUS D'UNE SURFACE COMBUSTIBLE, ON DOIT PRÉVOIR UNE PLAQUE D'ACIER GALVANISÉ D'AU MOINS 1.43mm OU UNE PLAQUE D'ACIER SANS REVÊTEMENT DE 1.6mm SE PROLONGEANT SUR AU MOINS 150mm TOUT AUTOUR DE L'APPAREIL.

9-27

4.3 External Dimensions and Panel Cut Dimensions
(Unit: mm)

(Common to both UT37 and UT38.)



5. WIRING

5.1 How to Wire

Referring to "5.3 Terminal Wiring Diagram," make wiring connection according to the following descriptions.

(1) For thermocouple inputs, use the proper compensation leadwires.

(2) For RTD (Resistance Temperature Detector) inputs, use three wires each of which have low resistance and all of which have equal wire resistance.

(3) For power supply wiring, use leadwires or cables which have performance characteristics equivalent to, or better than, 600V grade polyvinyl chloride insulated wires (JIS C3307). if necessary, insert a noise filter into the power supply circuit.

(4) Perform grounding with a thick wire whose cross section is 2 mm^2 or more, so that the grounding resistance is 100Ω or less.

(5) Correctly install input circuit wiring so as not to induce noise.

(a) Install input circuit wiring, keeping the circuits away from the power circuits and ground circuits.

(b) For noise due to static induction, use of shielded wire is recommended. Connect the shield wire to the earth terminal of the controller UT37/UT38 as necessary. (Be careful not to create two-point grounding as a result.)

(6) When connecting wires to each terminal, it is recommended to use a crimping terminal lug with an insulating sleeve (for ISO 3.5 mm screws.)

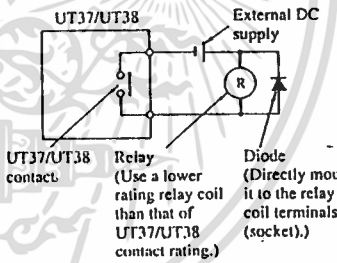
5.2 Cautions

(1) No fuse or power switch is provided for the controller. If necessary, provide them outside the controller.
Use a time lag fuse of 250V, at a rated current of 1A.

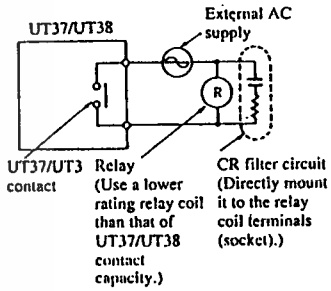
(2) When a relay contact output exceeds the contact capacity (250V AC, 3A, resistive load for control output and 250V AC, 1A, resistive load for the alarm outputs), use an auxiliary relay for turning ON/OFF the load.

(3) If an inductive load such as an auxiliary relay is used for the relay contact output circuit, connect a CR network (for AC) or a diode (for DC) in parallel, as a surge suppressor circuit for spark elimination.

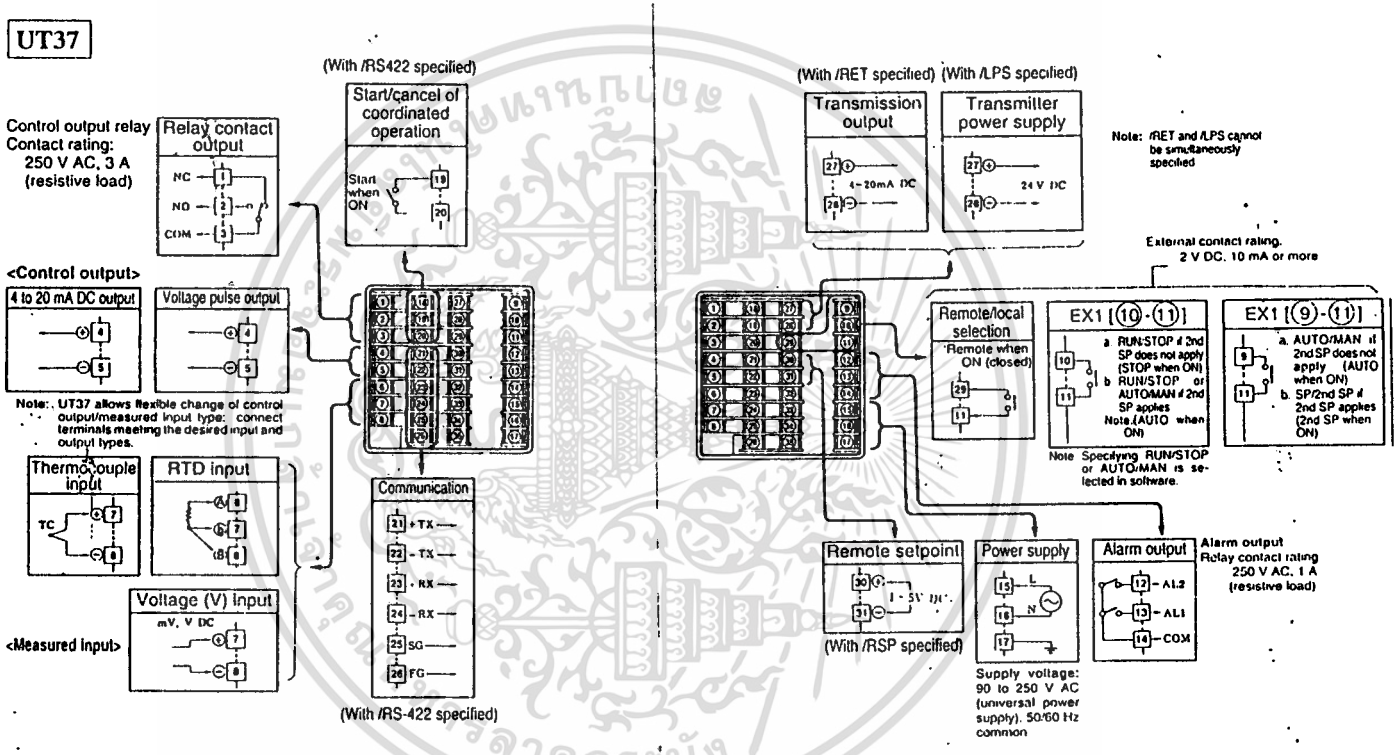
• For DC Relay:

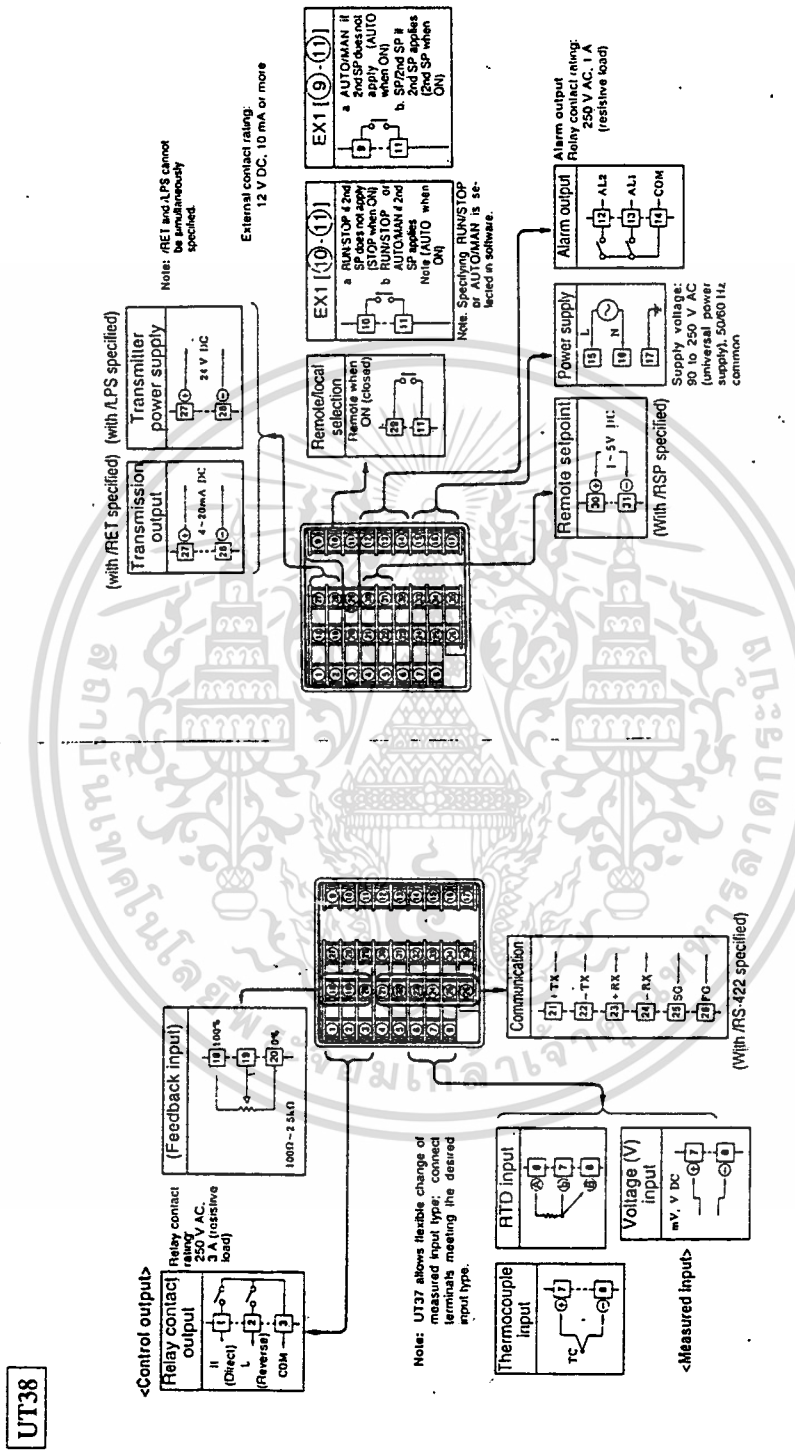


• For AC relay:



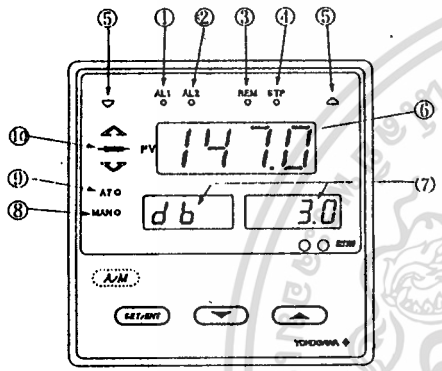
5.3 Terminal Wiring Diagram





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

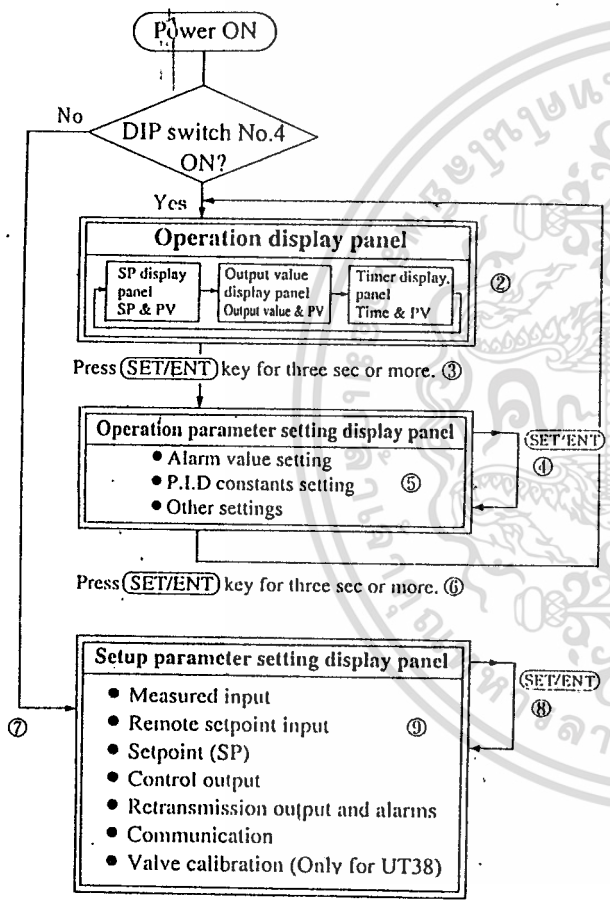
6. FRONT PANEL DISPLAY PANELS AND CONTROL KEYS



Key	Function
(SET/ENT)	• Transfers each operation display panel (when pressed within three sec). • Alternatively transfers the operation display panel to the operation setting display panel and vice versa (when pressed for three sec or more). • Calls up each parameter setting display panel. • Registers numeric values.
(▼) (▲)	Changes displayed numeric values of target setpoint, parameter, and output value (in the manual operation mode). (▼) (down) key for decrement and (▲) (up) key for increment. These keys change the numerical value by one every time pressed, but when held down change with increasing speed.
(A/M)	Used for selecting AUTO (automatic) or MAN (manual) operation.

No.	Display	Function
①	AL1 ○ (Alarm 1 lamp)	Lights when alarm 1 is activated.
②	AL2 ○ (Alarm 2 lamp)	Lights when alarm 2 is activated.
③	REM ○ (Remote mode indicating lamp)	Lights in REM (remote setting) mode. [Extinguishes in LOCAL (local setting) mode.]
④	STP ○ (Stop mode indicating lamp)	Lights in STP (operation stop) mode. [Extinguishes in RUN (operation) mode.]
⑤	(Output monitor)	Functions only for UT38. ⬠ lights for L side output and ⬡ for H side output.
⑥	8888 (PV display)	Displays measured value (PV).
⑦	888 8888 (Setpoint and parameter display)	Displays the setpoint (SP) and various parameters.
⑧	MAN ○ (Manual mode execution display lamp)	Lights in MAN (manual operation) mode. [Extinguishes in AUTO (automatic operation) mode.]
⑨	AT ○ (Auto-Tuning execution display lamp)	Flashes during auto-tuning.
⑩	(Deviation monitor)	When deviation (PV–SP) is within ±1.0% of full scale (F.S.), ▬ (green) lights. If it is over +1.0% of F.S., ▲ (orange) lights. If it is under –1.0% of F.S., ▼ (orange) lights. These are displayed only on operation display panel.

7. KEY OPERATION



① UT37/UT38 controller displays Operation Display. [Note that Operation Display appears only when the DIP switch No.4 is set to ON (Initialized value is ON). For approx. 2 sec after power ON, the controller displays Model, Input Range, etc., in the PV Display.]

② Operation Display consists of three display panels as standard: SP Display, Output Value Display, and Timer Display (for details, see Operation Manual (IM5B4B7-20E) KEY OPERATION). To changeover each Operation Display, press (SET/ENT) key.
- Select SP Display to change the SP value, pressing (▼) or (▲) + (SET/ENT) keys.
- Select Output Value Display to change the control output value using (▼) or (▲) key.
- Select Timer Display to change the timer setpoint, pressing (▼) and (▲) + (SET/ENT) keys.

③ To change Operation Display to Operation Parameter Setting Display, press and hold (SET/ENT) key for three sec or more.

④ To change each operation parameter item, press (SET/ENT) key within three sec.

⑤ To change the (displayed) settings of each operation parameter item, use (▼) or (▲) key. (During changing, the decimal point flashes.) After changing a setting, press (SET/ENT) key to enter (register) it.

⑥ Operation Parameter Setting Display is changed to Operation Display when
- (SET/ENT) key is pressed and held for three sec or more.

⑦ To change the display panel to Setup Parameter Setting Display, set the DIP switch No.2 key to OFF and turn power ON (Note 1).

⑧ To change display panel for each setup parameter item, press (SET/ENT) key within three sec.

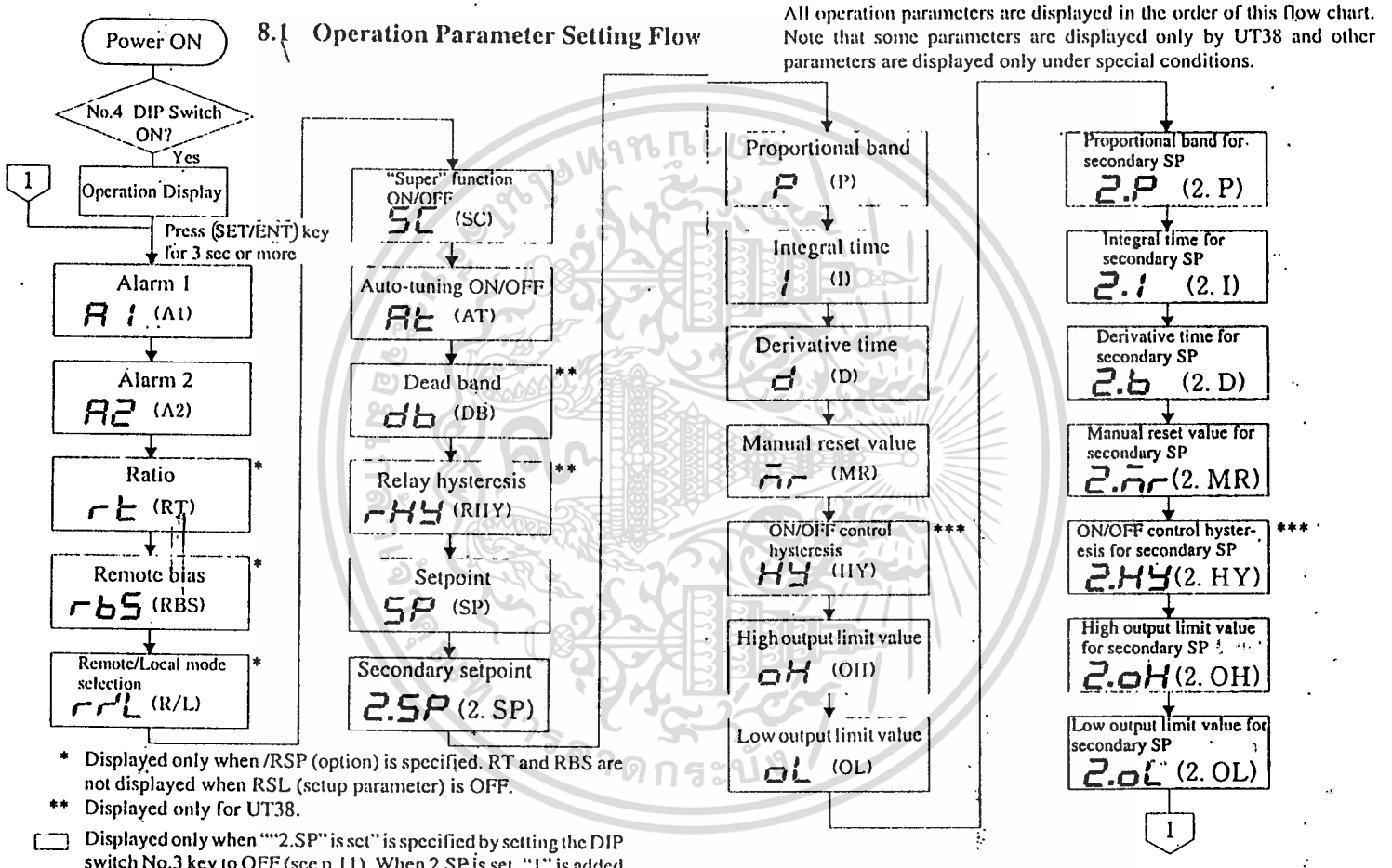
⑨ To change the displayed) settings of each setup parameter item, use (▼) or (▲) key. (During changing, the decimal point flashes.) After changing, press (SET/ENT) key to enter (register) the changed value.

Note 1: Be sure to reset DIP switch No.4 key to ON after completing setup parameter setting.

8. OPERATION PARAMETERS

8.1 Operation Parameter Setting Flow

All operation parameters are displayed in the order of this flow chart. Note that some parameters are displayed only by UT38 and other parameters are displayed only under special conditions.



* Displayed only when /RSP (option) is specified. RT and RBS are not displayed when RSL (setup parameter) is OFF.

** Displayed only for UT38.

☐ Displayed only when ""2.SP" is set" is specified by setting the DIP switch No.3 key to OFF (see p.11). When 2.SP is set, "1" is added on the displays of SP and P through OL, meaning No.1 (main).

1.SP

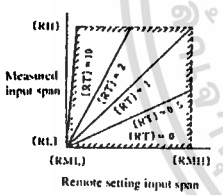
*** Only HY is displayed when ON/OFF relay output is specified (see p.10). P, I, D, MR, OH, and OL as well as those for secondary SP are not displayed.

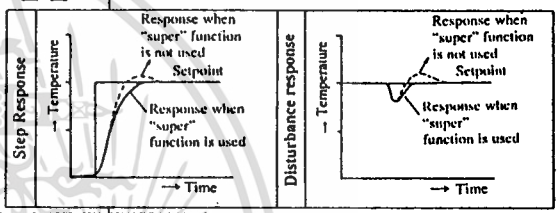
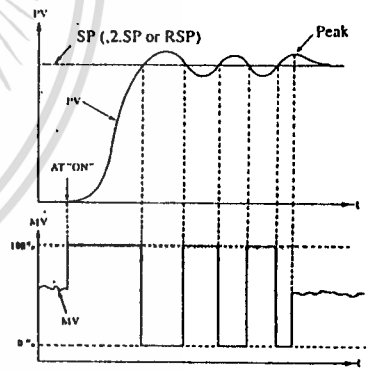
8.2 Operation Parameter List

Display	Setting Item	Setting Range	Initial set value	Customer's set value	Reference page
A1 (A1)	Alarm 1	• EU (0%) to EU (100%) for PV (measured value) alarm • EU (0%) S to EU (100%) S for deviation alarm • OFF or 0.00 to 59.99 min/sec (or hour/min) for A1 timer	EU (100%) as PV high limit alarm		P.30
A2 (A2)	Alarm 2		EU (0%) as PV low limit alarm		P.30
rt (RT)	Ratio	0.000 ~ 9.999	1.000		P.30
rbS (RBS)	Remote bias	EU (–100%) S ~ EU (100%) S	EU (0%) S		P.30
r/L (R/L)	Remote/ Local mode selection	LOCL (local) or REM (remote)	LOCL		P.30
SC (SC)	"SUPER" function ON/OFF	ON or OFF	OFF		P.31
At (AT)	Auto-tuning ON/OFF	ON or OFF	OFF		P.31
db (DB)	Dead Band (only for UT38)	1.0 ~ 10.0% (Percentage to computed control output value)	3.0%		P.32
rHY (RHY)	Relay hysteresis (only for UT38)	0.1 ~ 0.5% (Percentage to computed control output value)	0.5%		P.32
SP (SP)	Setpoint (main)	EU (0%) ~ EU (100%)	EU (0%)		P.32
2.SP (2. SP)	Secondary setpoint	EU (0%) ~ EU (100%)	EU (0%)		P.33

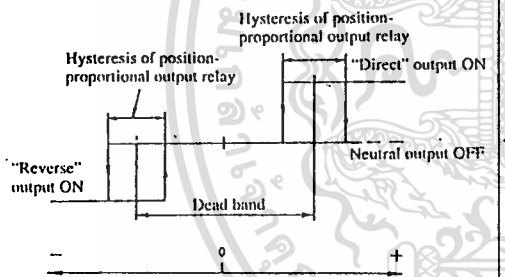
Display	Setting Item	Setting Range	Initial set value	Customer's set value	Reference page
P (P)	Proportional band	0.1 ~ 999.9%	5.0%		P.33
I (I)	Integral time	OFF or 1 ~ 6000 sec	240 sec		P.34
d (D)	Derivative time	OFF or 1 ~ 6000 sec	60 sec		P.35
mr (MR)	Manual reset value	–5.0 ~ 105.0%	50.0%		P.35
HY (HY)	ON/OFF control hysteresis	EU (0.0%)S ~ EU (100.0% S	EU (0.5%)S		P.35
oH (OH)	Output high limit value	–5.0≤OL<OH ≤105.0%	100.0%		P.35
oL (OL)	Output low limit value	(Percentage to computed control output value)	0.0%		P.35
2.P (2. P)	Proportional band for secondary SP	0.1 ~ 999.9%	5.0%		P.35
2.I (2. I)	Integral time for secondary SP	OFF or 1 ~ 6000 sec	240 sec		P.35
2.d (2. D)	Derivative time for secondary SP	OFF or 1 ~ 6000 sec	60 sec		P.35
2.mr (2. MR)	Manual reset value for secondary SP	–5.0 ~ 105.0%	50.0%		P.35
2.HY (2. HY)	ON/OFF control hysteresis for secondary SP	EU (0.0%) S ~ EU (100.0%) S	EU (0.5%)S		P.35
2.oH (2. OH)	Output high limit value for secondary SP	–5.0≤OL<OH ≤105.0%	100.0%		P.35
2.oL (2. OL)	Output low limit value for secondary SP	(Percentage to computed control output value)	0.0%		P.35

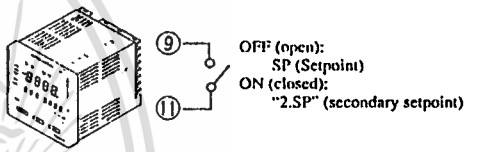
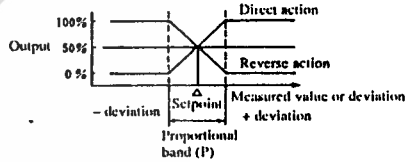
8.3 Description of Operation parameters (1/3)

Parameter	Description
Alarm 1 A 1 (A1)	• Set alarm 1 and alarm 2 values. • For AL1 and AL2 (setup parameters) to select alarm type, see p.40. • The unit of A1 is hour/min or min/sec when A1 is set as timer function (see p.52).
Alarm 2 A2 (A2)	
Ratio rt (RT)	RT and RBS are provided only when /RSP (option) is specified. • Set ratio and remote bias so that the controller can be adapted to applications such as load distribution on a zone basis or air fuel ratio control. • The ratio is set as Ratio = 1, when the remote setting input span corresponds to the measured input span and represented with magnification to 1.
Remote bias rbS (RBS)	
Remote/ Local mode selection rrL (R/L)	R/L is provided only when /RSP (option) is specified. LoCL (Local) and rEn (Remote) are switched by pressing each key. (Local and Remote can be also switched by using external terminals. Key-pressing selection is subject to external terminal selection.)

Parameter	Description
"Super" function ON/OFF SC	○ Use "Super" function (overshooting suppress function): • To prevent overshooting. • To increase startup speed. • To accommodate frequent load variations. 
Auto-tuning ON/OFF AT (AT) Note: When High Output Limit Value is set to a value other than 100% and Low Output Limit Value to a value other than 0%, the control output becomes the specified values.	When auto-tuning is started (AT "ON"), the control output becomes 100% (or OH). The controller maintains the 100% (OH) output until PV reaches SP. If PV exceeds SP, the control output becomes 0% (or OL). The controller repeats this cycle three times, automatically determining the PID constant (Note).  Note: Auto-tuning can be started when UT37/UT38 operates AUTO and RUN mode.

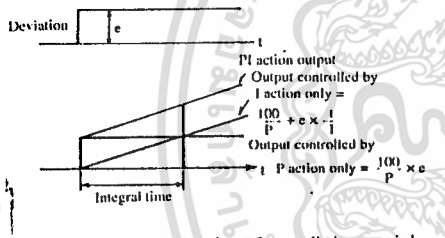
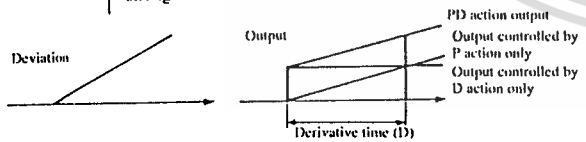
8.3 Description of Operation Parameters (2/3)

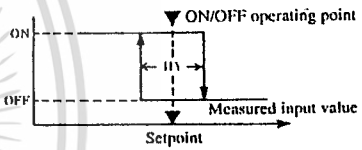
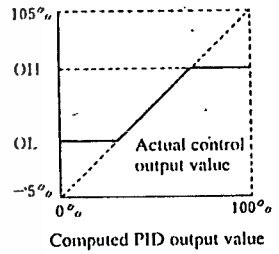
Parameter	Description
Dead Band db (DB) Only for UT38 Relay hysteresis rHY (RHY) Only for UT38	Only UT38 displays DB and RHY. • Set dead band (DB) and relay hysteresis (RHY) to prevent relays (or motors) for position-proportional PID output from being frequently activated. DB is set for output action between two relays and RHY for each relay. • When difference between computed PID output value and position signal at that time falls within the dead band, neither direct nor reverse action relays are activated. If the above difference exceeds the dead band on the positive side, direct action relays are activated. If the difference exceeds the dead band on the negative side, reverse action relays are activated (during reverse action).  (Computed PID output value — position signal)
Setpoint SP (SP)	Setpoint (SP) can be changed in the operation display panel. (See Operation Manual (IM5B4B7-20) KEY OPERATION) SP parameter allows the controller to display/change SP value while control is performed on secondary setpoint basis. 1.SP is displayed when secondary setpoint is setup.

Parameter	Description
Secondary setpoint 2.SP (2. SP) Relay hysteresis	"2.SP" is displayed only when ""2.SP" setting mode" is selected by turning OFF DIP switch No.3 (See p.11). To change SP to "2.SP" and vice versa, use external contact terminals described below. When "2.SP" setting mode is selected, Parameter Setting Display shows each display from Proportional band for "2.SP" to Low Output Limit Value (2.OL) for secondary SP, as shown in Operation Parameter Setting Flow (see p.26).  Volt-free contact (Contact capacity 12V DC and 10mA or more)
Proportional band P (P)	The proportional action control (P action) is a control method which generates control outputs whose values are proportional to deviations. For the control method, the measured-value changing (or deviation) which corresponds to 0 to 100% changing of control output (computed control output) must be represented in percentage. The changing rate in percentage is referred to as proportional band. When a measured value agrees with the setpoint, the output is generally 50%. In the proportional action, output oscillation which is a disadvantage of ON/OFF action can be eliminated.  Deviation = Measured value (PV) — Setpoint

9-37

8.3 Description of Operation Parameters (3/3)

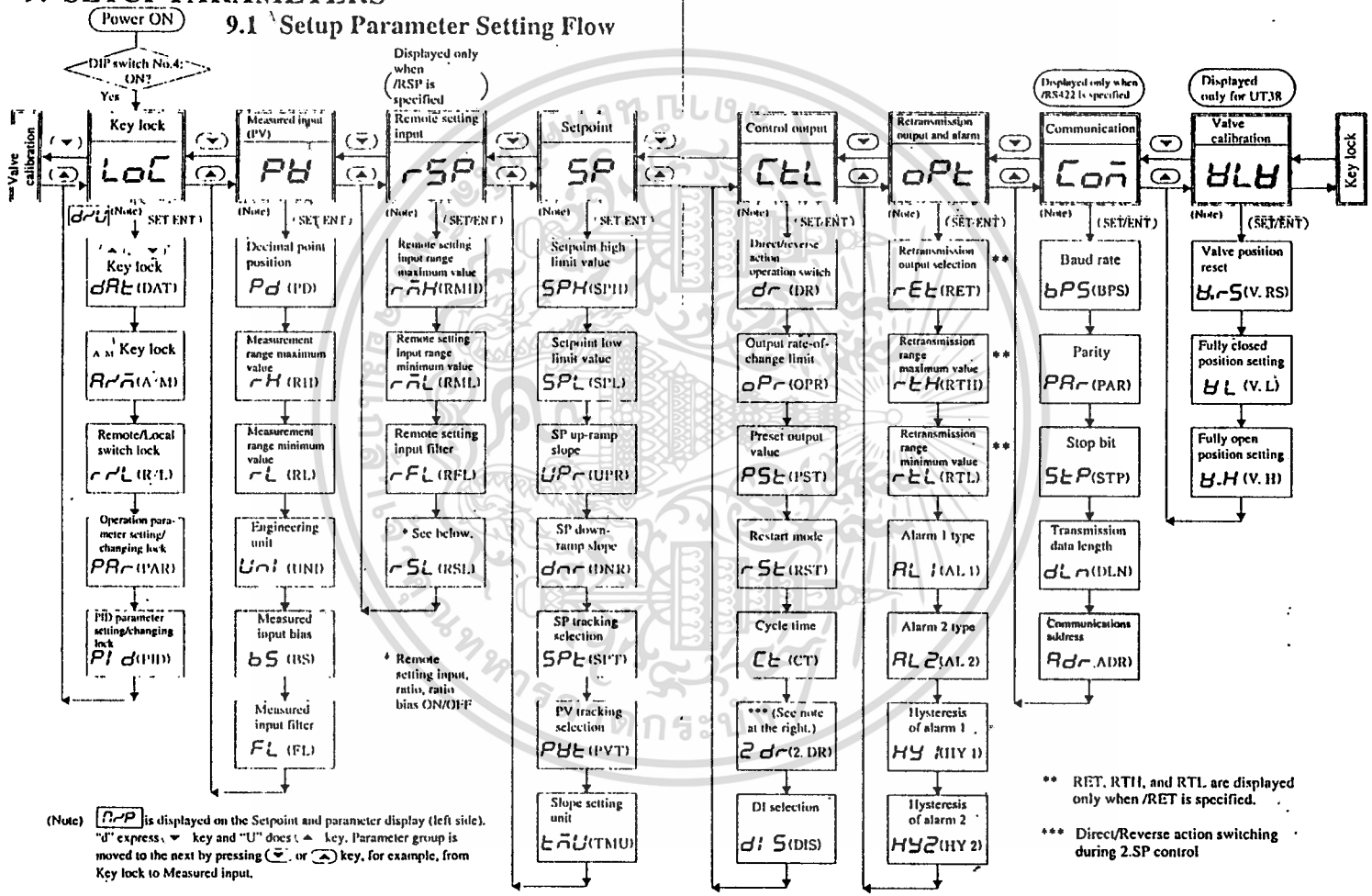
Parameter	Description
Integral time I (I)	In P action, the measured value does not necessarily agree with the setpoint and deviation may occur. The integral action [I action] is a control method which automatically adjusts control outputs so that any deviation as described above is zero. I action uses a value, referred to as Integral Time, to determine output variation rate corresponding to the deviation. The shorter the integral time, the stronger the integral action (the larger the output variation rate). I action is usually used in combination with P action, as PI action. In this PI action, integral time [I] is the duration which the output controlled only by I action requires until it is equal to the output controlled only by P action after a step input is applied. 
Derivative time d (D)	If the time constant or dead time of controlled system is large, P or PI action may cause the response to be late or to generate overshoot, leading the control system to an unstable state. Derivative action (D action) can control the output so that it is proportional to the input (deviation) rate-of-change, attaining faster response and more stable operation of the control system. D action is used in combination with P or PI action, as PD or PID action. In PD action, the derivative time [D] is duration which the output controlled only by P action requires until it becomes equal to the output controlled only by D action after a ramp input (a constant rate-of-change input) is applied. The longer the derivative time, the stronger the derivative action. 

Parameter	Description
Manual reset value rr (MR)	MR is effective only when integral time (I) is turned OFF. P and PD actions cannot always eliminate deviation, which is called offset. To eliminate the offset, adjust the manual reset value. (Integral action automatically performs this reset operation.)
ON/OFF control hysteresis HY (HY)	HY is displayed only when ON/OFF relay output is selected using rotary switch (B) (seep.10). ON/OFF control hysteresis is an operation gap which is set around ON/OFF operating point to prevent control output from chattering. 
Output high limit value oH (OH) Output low limit value oL (OL)	The parameters limit the control output operating range between OL and OH values. OL and OH are useful to specify the maximum and minimum output values for system protection. 

The parameters from Proportional Band for secondary SP (2. P) to Low Output Limit Value for secondary SP (2.OL) are not explained, because their functions are virtually the same as those from Proportional Band (P) to Low Output Limit Value (OL).

9. SETUP PARAMETERS

9.1 Setup Parameter Setting Flow



(Note) [n.rP] is displayed on the Setpoint and parameter display (left side). "d" expresses ▼ key and "U" does ▲ key. Parameter group is moved to the next by pressing (▼) or (▲) key, for example, from Key lock to Measured input.

9.2 Setup Parameter List (1/2)

Related function	Code	Setting Item	Setting Range	Initial value	Customer's set value	Reference page
Key lock	dAt (DAT)	Key lock	OFF or ON	OFF (Unlocked)		P.42
	A/M (A/M)	Key lock	OFF or ON	OFF (Unlocked)		P.42
	rrL (R/L)	Remote/ Local switch lock	OFF or ON	OFF (Unlocked)		P.42
	PAr (PAR)	Operation parameter setting/ changing lock	OFF or ON	OFF (Unlocked)		P.42
	PId (PID)	PID parameter setting/ changing lock	OFF or ON	OFF (Unlocked)		P.42
Measured input	Pd (PD)	Decimal point position	0, 1, 2, or 3	1		P.43
	rH (RH)	Measurement range maximum value	EU (0%) ≤ RL <RH ≤ EU (100%)	EU (100%) [100 for linear input]		P.43
	rL (RL)	Measurement range minimum value	For linear input: −1999 < RL ≤ RH ≤ 9999	EU (0%) [0.0 for linear input]		P.43
	Uni (UNI)	Engineering unit	°C or F	°C		P.43
	bS (BS)	Measured input bias	EU(−100.0%)S ~ EU(100.0%)S	EU (0.0%)S		P.43
	FL (FL)	Measured input filter	OFF, 1 ~ 120 sec.	OFF (No filter)		P.43

Related function	Code	Setting Item	Setting Range	Initial value	Customer's set value	Reference page
Remote setting input	rMH (RMH)	Remote setting input range maximum value	−1999≤RML < RMH ≤ 9999	Same as RH		P.44
	rML (RML)	Remote setting input range minimum value		Same as RL		P.44
	rFL (RFL)	Remote setting input filter	OFF, 1 ~ 120 sec	OFF (No filter)		P.44
	rSL (RSL)	Remote setting input, Ratio, Ratio bias ON/OFF	OFF or ON	OFF		P.44
Setpoint (SP)	SPH (SPH)	Setpoint high limit value	Measurement range maximum value → RL≤SPL<SPH≤ RH ↑ Measurement range minimum value	Same as RH		P.44
	SPL (SPL)	Setpoint low limit value		Same as RL		P.44
	UPr (UPR)	SP up-ramp slope	OFF or EU (0%) S/hr or min (Specify when setting "TMU.") to EU (100%) S/hr or min (Specify when setting "TMU.")	OFF (No slope)		P.45
	dnr (DNR)	SP down-ramp slope		OFF (No slope)		P.45
	SPt (SPT)	SP tracking selection	OFF or ON	ON (Tracking is specified.)		P.46
	PVt (PVT)	PV tracking selection	OFF or ON	OFF (Tracking is not specified.)		P.47
	tMU (TMU)	Slope setting unit	0 (hr) or 1 (min)	0 (hr)		P.47

9.2 Setup Parameter List (2/2)

Related function	Code	Setting Item	Setting Range	Initial value	Customer's set value	Reference page
Control output	dr (DR)	Direct/reverse action operation switch	0 (Reverse) or 1 (Direct)	0 (Reverse)		P.48
	oPr (OPR)	Output rate-of-change limit	OFF, 0.1 ~100.0% per sec (of output value)	OFF		P.48
	PSt (RST)	Preset output value	-5.0 to 105.0% (of output value)	0.0%		P.49
	rSt (RST)	Restart code	0, 1 or 2	0 (Continuing after power recovery)		P.49
	Ct (CT)	Cycle time	1 ~ 240 sec	30 sec		P.49
	2.dr (2. DR)	Direct/Reverse action switch during 2.SP control	0 (Reverse action) or 1 (Direct action)	0 (Reverse action)		P.50
	dIS (DIS)	DI selection	0 (Run/Stop) or 1 (AUTO/MAN)	0 (Run/Stop) ⑩-⑪		P.50
Retransmission output and alarm	rEt (RET)	Retransmission output selection	0, 1, 2, 3 or 4	0		P.51
	rtH (RTH)	Retransmission range maximum value	EU(0.0%)≤ RTL <RTH≤EU (100.0%)	Same as RH [EU (100.0%)]		P.51
	rtL (RTL)	Retransmission range minimum value		Same as RL [EU (100.0%)]		P.51
	AL 1 (AL 1)	Alarm 1 type	OFF, 1 ~ 24	1 (Measured value high limit)		P.51
Retransmission output and alarm	AL2 (AL 2)	Alarm 2 type	OFF, 1 ~ 20	2 (Measured value high limit)		P.51
	HY1 (HY1)	Alarm 1 hysteresis	EU(0.0%)S~ EU(100.0%)S	EU(0.5%)S		P.54
	HY2 (HY2)	Alarm 2 hysteresis	EU(0.0%)S~ EU(100.0%)S	EU(0.5%)S		P.54
Communication	bPS (BPS)	Baud rate	150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600 BPS	9600BPS		See Instruction Manual (Communication Manual)
	PAr (PAR)	Parity	NONE, EVEN or ODD	NONE (No parity)		
	StP (STP)	Stop bit	1 (1 bit) or 2 (2 bit)	1 (1 bit)		
	dLn (DLN)	Transmission bit length	7 (7 bit) or 8 (8 bit)	8 (8 bit)		
	Adr (ADR)	Communications address	1 to 98 (or 99 for coordination operation) (the maximum number of units to be connected is 16)	1		
Valve calibration (only for UT38)	V.rS (V.RS)	Valve position reset	To reset the valve position to the pre-adjustment status, register "1."	—		P.54
	V.L (V.L)	Fully closed position setting	Approx. 0%	—		P.54
	V.H (V.H)	Fully open position setting	Approx. 100%	—		P.54

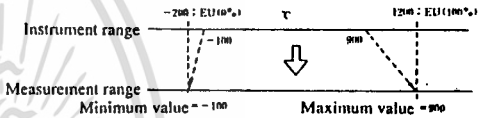
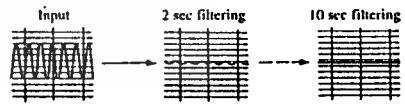
9.3 Description of Setup Parameters

9.3.1 Parameters for Key Lock

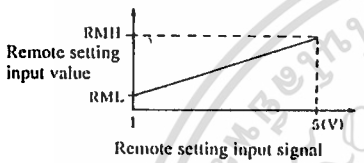
Select ON (Key Lock) or OFF (No key Lock) for the following parameters. Key Lock is provided against mis-operation. Operation display panel can be changed in Key Lock mode.

Parameter	Description (for Key Lock status)
(▲), (▼) Key lock dAt (DAT)	Disables you to set and change all parameters by key operation (except the key operation for canceling this Key Lock status).
(A/M) Key lock A/M (A/M)	Disables you to switch AUTO (automatic operation) / MAN (manual operation) using (A/M) key. AUTO/MAN can be selected using external contact even when this parameter is set to ON.
Remote/Local switch lock r/L (R/L)	Disables you to switch REM (remote)/LOCL (local) by key operation. (When this is set to ON, "R/L" parameter display disappears.) REM/LOCL can be selected using external contact.)
Operation parameter setting/ changing lock PAr (PAR)	Disables you to set and change operation parameters by key operation.
PID parameter setting/ changing lock PId (PID)	Disables you to set and change the following operation parameters: P, I, D, MR, HY, OH, OL, 2.P, 2.I, 2.D, 2.MR, 2.HY, 2.OH, and 2.OL (When this is set to ON, parameter displays disappear.)

9.3.2 Parameters for Measured Input

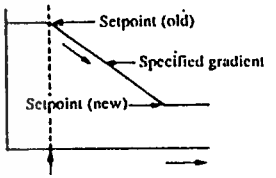
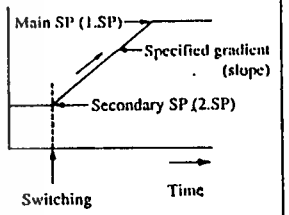
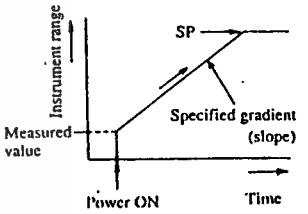
Parameter	Description
Decimal point position Pd (PD)	Set decimal point position of input range for voltage input such as 1 to 5V DC. 0 : –1999 to 9999 (No decimal point) 1 : –199.9 to 999.9 (Up to first decimal point position) 2 : –19.99 to 99.99 (Up to second decimal point position) 3 : –1.999 to 9.999 (Up to third decimal point position)
Measurement range maximum value rH (RH)	Set the maximum and minimum values in a instrument range code to fix a measurement range as needed. 
Measurement range minimum value rL (RL)	Meter accuracy is not subject to measurement range changing.
Engineering unit Uni (UNI)	Set to °C or °F the engineering unit for temperature input (through TC or RTD). The unit cannot be set for voltage input. (Use an attached "unit" label.
Measured input bias bS (BS)	Adds bias value to measured input value for the display and control. Measured value for the display and control = Measured input value + bias value [EU(–100.0%)S ~ EU(100.0%)S]
Measured input filter FL (FL)	Useful when noise in input signals causes noticeable fluctuation of displayed value. Set the parameter as a time constant of the first-order lag type filter. The longer the time constant, the better the filtering performance. 

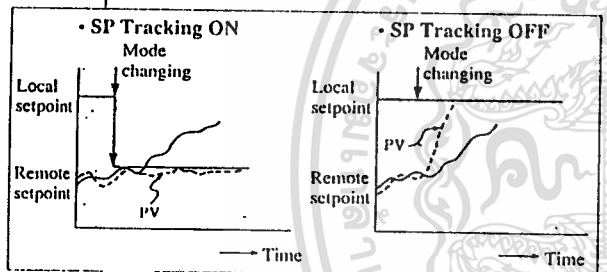
9.3.3 Parameters for Remote Setting Input

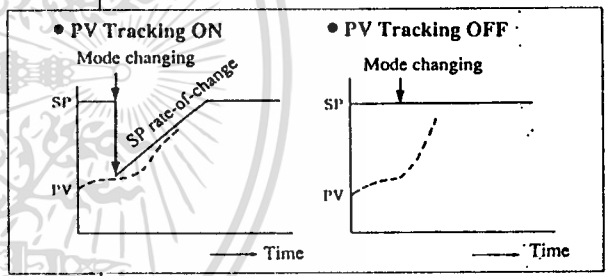
Parameter	Description
Remote setting input range maximum value rāH (RMH)	RMH and RML are set for scaling of remote setting input and not subject to instrument range.  Remote setting input signal
Remote setting input range minimum value rāL (RML)	
Remote setting input filter rFL (RFL)	Remote setting input signal can be filtered. The function is the same as that of measured input filter (see p.43).
Remote setting input, ratio, ratio bias ON/OFF rSL (RSL)	Set RSL as ON when the function ratio and ratio bias is needed. RT and RBS is effective when RSL is set as ON (see p.30).

9.3.4 Parameters for Setpoint (SP)

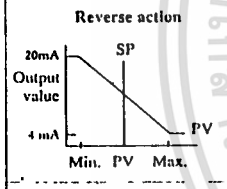
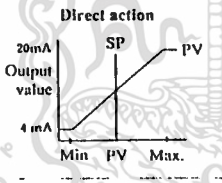
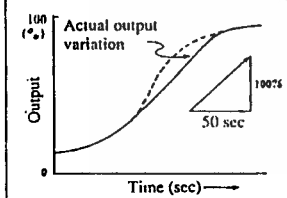
Parameter	Description
Setpoint high limit value SPH (SPH)	SPH and SPL limit Setpoint range within Measurement range. This is effective for Remote setting input.
Setpoint low limit value SPL (SPL)	

Parameter	Description
SP up-ramp slope UPr (UPR) SP down-ramp slope dnr (DNR) Slope setting unit (TMU) This parameter is set after PV tracking selection setting (See p.36.)	Respectively set ascending and descending slope (rate-of-change) when rapid changing of setpoint (SP) is not desirable or when SP must be changed at a constant gradient (slope). Available in the following three cases. ① When target setpoint is changed:  ② When setpoint is switched to secondary setpoint ("2.SP") and vice versa:  ③ When power is turned ON (or power failure is recovered): SP value changes at the gradient (slope) from the current measured value (PV) to setpoint. 

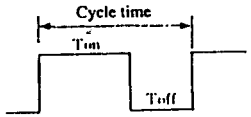
Parameter	Description
SP tracking selection SPt (SPT)	Use SPT parameter to select or not select SP Tracking. When SP Tracking is selected, the local (internal) setpoint is tracked to the remote setpoint in REM (remote) mode. SP Tracking therefore suppresses output variation due to deviation caused when REM is changed to LOCAL mode. OFF: Not select ON : Select 

Parameter	Description
PV tracking selection PVt (PVT)	Use PVT parameter to select or not select PV Tracking. When PV tracking is selected, the setpoint (SP) is tracked to the measured value (PV). Thereby, PV Tracking suppresses output variation caused when an operation mode is changed to AUTO and RUN mode (as shown below). OFF : Not select ON : Select ① Change from MAN (manual) and RUN (operation) to AUTO (automatic) and RUN (operation) ② Change from MAN (manual) and STOP (operation stop) to AUTO (automatic) and RUN (operation) ③ Turning ON power, setting to AUTO (automatic) and RUN (operation)  When PV tracking is selected, the setpoint (SP) is tracked once to the measured value (PV) and then to the original SP value according to rate-of-change. [Note: PV tracking is not activated when UPR or DNR is set to OFF.]
Slope setting unit tmU (TMU)	Set UPR or DNR (see p.45) rate-of-change unit to 0 (hour) or 1 (min).

9.3.5 Control Parameters

<table>
<tr><th>Parameter</th><th>Description</th></tr>
<tr><td>Direct/Reverse Action operation switch
dr
(DR)</td><td>The direct/reverse action determines, as shown below, whether output increases or decreases when deviation (PV – SP) is positive or negative.
<table>
<tr><td>Action</td><td colspan="2">PV > SP</td><td colspan="2">PV < SP</td></tr>
<tr><td></td><td>Reverse</td><td>Direct</td><td>Reverse</td><td>Direct</td></tr>
<tr><td>ON-OFF</td><td>OFF</td><td>ON</td><td>ON</td><td>OFF</td></tr>
<tr><td>mA output</td><td>Current decreases.</td><td>Current increases.</td><td>current decreases.</td><td>Current increases.</td></tr>
<tr><td>ON OFF time proportional control</td><td>ON time decreases.</td><td>ON time increases.</td><td>ON time decreases.</td><td>ON time increases.</td></tr>
<tr><td>Position-proportional control</td><td>L-C closes.</td><td>H-C closes.</td><td>L-C closes.</td><td>H-C closes.</td></tr>
<tr><td>Output variation direction</td><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>Output rate-of change limit
oPr
(OPR)</td><td>Set the output rate-of-change limit to prevent rapid output changing from imparting shock to the process or actuators. This parameter limits the output rate-of-change. (Note: Setting of output rate-of-change limit may offset the derivative action effect.)
 

Example
Limiting rate-of-change = 2.0 (% per sec)
To change output from 0 to 100% for 50 sec, set the parameter to 2.0 (% per sec).</td></tr>
</table>

<table>
<tr><th>Parameter</th><th>Description</th></tr>
<tr><td>Preset output value
PSt
(PST)</td><td>PST allows preset output value, neither automatic nor manual output value, to be generated when operation mode is changed from RUN to STOP.
The preset output value is not limited by Output High Limit Value nor by Low Limit Value.
Change the mode from STOP to RUN in balanceless-bumpless mode using external terminals ⑩ and ⑪. (OFF: RUN, ON: STOP)
<table>
<tr><td rowspan="2">Mode</td><td colspan="2">RUN (operation)
Control program is running.</td><td>STOP
Control program is stopped.</td></tr>
<tr><td>AUTO</td><td>MAN</td><td>—</td></tr>
<tr><td>Output</td><td>OutputOutput value based on computed control results</td><td>Output value entered by manual key operation</td><td>Preset output value</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>Restart code
rSt
(RST)</td><td>Select status controller enters after recovery from power failure.
0 : Controller continues the operation before power failure.
1 : Controller enters MAN (manual) mode. Control output is preset-output-value described above.
2 : Controller continues the operation before power failure. Control output is preset-output-value described above.</td></tr>
<tr><td>Cycle time
Ct
(CT)</td><td>Controller outputs computed PID results in the form of ON/OFF signal pulse width when it operates in time-proportional PID output (relay or voltage pulse output) mode. This output time ratio (%) corresponds to the ratio of T-on time to the cycle time.
 
</td></tr>
</table>

Parameter	Description
Direct/Reverse action selection during 2.SP operation 2.dr (2. DR)	Select direct or reverse action while the controller operates for secondary setpoint. (This parameter can be set independently of main setpoint control.) For direct and reverse actions, see the description of DR (p.48).
DI selection dI S (DIS) Only when 2.SP is used	Function assigned to DI terminal changes depending on whether secondary setpoint (2.SP) is set using DIP switch No.3. When secondary setpoint (2.SP) is set, select a function using this DIS parameter.

DI terminal No.	No "2.SP" setting mode	"2.SP" setting mode
⑨	AUTO/MAN (automatic/manual) Selection	1.SP/"2.SP" selection
⑩	RUN/STOP (operation/stop) selection	(I) RUN/STOP (initial value) or (II) AUTO/MAN
⑪	COM terminal	

When DIS is set to 0, (I) RUN/STOP is selected.
When DIS is set to 1, (II) AUTO/MAN is selected.

9.3.6 Parameters for Retransmission Output and Alarm

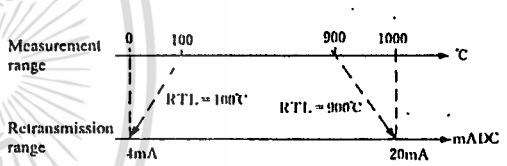
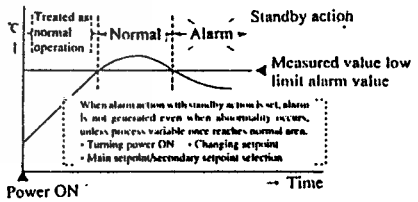
Parameter	Description
Retransmission output selection rEt (RET)	Displayed only when /RET (option) is specified. (4 to 20mA DC output) Select retransmission output signal from among the following five values. 0 : Measured value (corresponding to Measurement range minimum value (RL) through Measurement range maximum value (RH)) 1 : Setpoint (same as above) 2 : Output value 3 : Measured value (corresponding to Retransmission range minimum value (RTL) through Retransmission range maximum value (RTH)) 4 : Setpoint (same as above)
Retransmission range maximum value rtH (RTH) Retransmission range minimum value rtL (RTL)	If 3 or 4 is selected for retransmission output selection (RET), the retransmission range is represented with the measurement range scaled with RTH and RTL. Accuracy is consistent with the relationship between instrument range and measurement range. (See p.43.) 
Alarm 1 type AL 1 (AL1) Alarm 2 type AL2 (AL2)	• Assign an alarm type respectively to Type of Alarm 1 or Type of Alarm 2 by selecting a type code from the table described on the next page. • Alarm 1 type has a timer function which is available by selecting a function from the table described on the next page. • Alarm action with standby action operates as shown below. Example of Measured value low limit alarm with standby action 

Table Alarm Type Code

Alarm type	Alarm action (Open/Closed represents relay contact status. (Lit)/(Extinguished) represents lamp status.)	Alarm type code	Alarm type	Alarm action (Open/Closed represents relay contact status. (Lit)/(Extinguished) represents lamp status.)	Alarm type code
Without alarm		OFF			
PV high limit	Hysteresis; Open (Extinguished) / Closed (Lit); PV; alarm setting	1 / 11	De-energize on deviation low limit alarm	Hysteresis; Open (Extinguished) / Closed (Lit); Deviation setting; SP; PV	6 / 16
PV low limit	Closed (Extinguished) / Open (Extinguished); Hysteresis; Alarm setting; PV	2 / 12	Deviation high/low limit	Closed (Lit) / Open (Extinguished); Hysteresis; Deviation setting; SP; PV	7 / 17
Deviation high limit	Hysteresis; Open (Extinguished) / Closed (Lit); PV; SP; Deviation setting	3 / 13	Within deviation high/low limit	Closed (Lit) / Open (Extinguished); Hysteresis; Deviation setting; SP; PV	8 / 18
Deviation low limit	Hysteresis; Closed (Lit) / Open (Extinguished); Deviation setting; SP; PV	4 / 14	De-energize on PV high limit	(Extinguished) / Closed; Hysteresis; (Extinguished) / Open; Alarm setting; PV	9 / 19
De-energize on deviation high limit	(Extinguished) / closed; Hysteresis; Open (Lit); Deviation setting; PV; SP	5 / 15	De-energize on PV low limit	(Extinguished) / Closed (Lit); Hysteresis; Open; PV; Alarm setting	10 / 20

Note: Codes 1 to 10 are for alarm without standby action.
Codes 11 to 20 are for alarm with standby action.

Table Timer Type Code (Only AL1)

Timer function details	Timer type code
Detection direction: Upward Time unit: Hour, min	21
Detection direction: Downward Time unit: Min, sec	22
Detection direction: Upward Time unit: Hour, min	23
Detection direction: Downward Time unit: Min, sec	24

Note 1: When timer codes listed at the left are specified for alarm type 1, setting range of alarm 1 (A1) setting is:

OFF, 00.00 to 99.59 hour/min

or

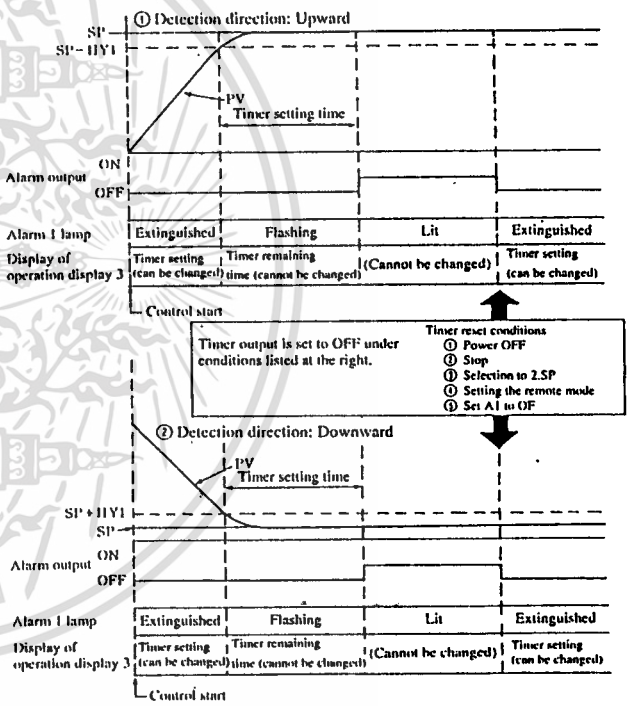
OFF, 00.00 to 99.59 min/sec

Note 2: For alarm 1 type, timer display appears when the timer codes listed at the left are specified. Instruction manual (IM5B4B7-20E) Operation Display ③

Timer function operation is described below.

Timer function turns ON the relay output for alarm 1 when time specified (by A1) for the internal UT37/38 timer elapses from the time when input measured value (PV) reaches setpoint (SP) (and its hysteresis width area specified by HY1).

Note: Timer does not work for 2.SP



Note: Timer start counting when PV reach the final target SP in case "SP up/down-ramp slope" function is used.

Parameter	Description
Hysteresis of alarm 1 HY1 (HY1)	Set the hysteresis width to suppress hysteresis error, when alarm repeats ON/OFF frequently. Alarm 1 and alarm 2 are used independently of each other. For hysteresis width for each alarm type (set by AL1 and AL2), see p.52 of the table "Alarm Type Code."
Hysteresis of alarm 2 HY2 (HY2)	

For communication parameters, see the separate Instruction Manual (Communication Manual) (IM5B4B7-50). These parameters are displayed only when /RS422 (optional code) is specified.

9.3.7 Valve Calibration Parameters (Only for UT38)

Parameter	Description
Valve position reset V.rS (V. RS) Note	V.L and V.H are initialized when V.RS is set to "1" and (SET/ENT) key is pressed. Valve position is displayed when V.RS is set to "0" and (SET/ENT) key is pressed.
Fully closed position setting V.L (V. L) Note	V.L is flashing when V.L is not set. Fully closed position can be adjusted by V.L Press ▼ key to close the valve fully. After the valve is closed fully, press (SET/ENT) key to finish adjustment. When (SET/ENT) key is pressed, 0.0 is displayed and V.L lights.
Fully open position setting V.H (V. H) Note	V.H is flashing when V.H is not set. Fully open position can be adjusted by V.H Press ▲ key to open the valve fully. After the valve is open fully, press (SET/ENT) key to finish adjustment. When (SET/ENT) key is pressed, 100.0 is displayed and V.H lights.

Note: Be sure to adjust the valve because it is not adjusted by initial value.

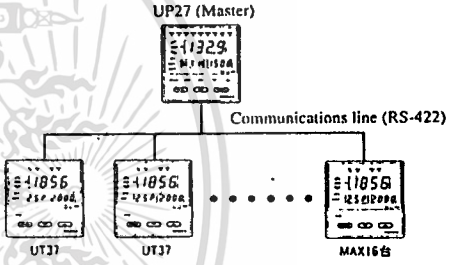
10. OTHER FUNCTIONS

10.0 Coordinated Operation

Coordinated operation works when | /RS422 | is specified. (UT38 has no coordinated operation function.)

Feature of Coordinated operation

- With a UP27 as the master station, UT37s (up to 16 units) can be connected using the communications bus for program operation.



(Note: UT38 has no coordinated operation function)

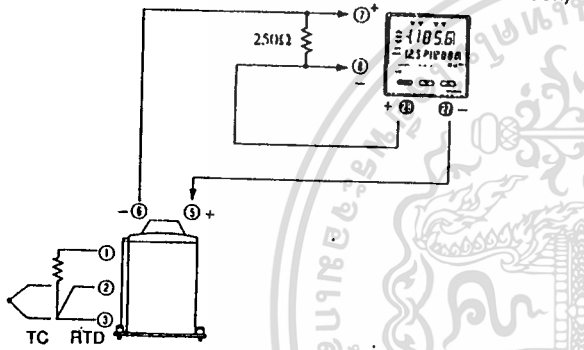
- Through coordinated operation, the following information can be downloaded by the UP27:
  ① Select UT37's PID parameters on a zone basis.
  ② Select UT37 operation mode.
  ③ Transmit setpoints to UT37 without error.
  ④ Transfer information required to optimize SUPER operation.
- In the details, see Instruction Manual (Communication Manual) IM5B4B7-50E.

10.2 Transmitter Loop Power Supply

The trasmitter power supply can be built in. (Shunt resistor of 250Ω is required.)

Power supply voltage: 21.6 ~28.0V(30mA MAX)
Terminal No.: ㉗(+), ㉘(–)

Example of ZT1000 (2-wire temperature Transmitter Connection)



Note: /LPS is not available if digital communication is simultaneously performed, overlaying the signal line.

11. STANDARD SPECIFICATIONS

Input: Universal Method (Input Type Selectable)	
Input sampling period:	200 ms
Input accuracy:	±0.2 (or ±0.25%) of F.S. ±1 digit
Input resistance:	Thermocouple input 1MΩ or more Voltage input Approx. 1MΩ
Permissible signal source resistance:	Thermocouple 250Ω or less Voltage 2kΩ or less
Permissible wiring resistance:	RTD input 10Ω or less/wire
Permissible input voltage:	Thermocouple, DC voltage/current input within ±10V
Noise rejection ratio:	Normal mode 40 dB (50/60Hz) or more Common mode 120 dB (50/60 Hz) or more
Filter:	OFF, 1 to 120 sec (first order lag. OFF: no filter.)
Measured input bias:	–100.0 to 100.0% of measuring span
Thermocouple standards:	IEC/DIN (U and L)/JIS
RTD standards:	IEC/DIN/JIS '89 JPT100, PT100
Display function	
Display contents:	Process variable (PV), setpoint/parameter, status lamps (6)
Process variable display:	4-digit, 7-segment LEDs (red)
Setpoint or parameter display:	3-digit + 4-digit, 7-segment LEDs (red)
Deviation monitor:	Green LED lights when deviation is within ±1.0 of F.S. If deviation exceeds this range, Orange LED lights.

Setting Specifications	
Setting range	
Measured input:	Within instrument range
Target value (setpoint):	0 to 100% of the range
Setpoint high and low limits:	0 to 100% of the range
Proportional band (P):	0.1 to 999.9%
Integral time (I):	OFF, 1 to 6000 sec (OFF: Integral action is OFF)
Derivative time (D):	OFF, 1 to 6000 sec (OFF: Derivative action is OFF)
Setpoint Resolution for Process Input	
Thermocouple input	1°C or 0.1°C (1°F or 0.1°F)
RTD input	0.1°C (0.1°F)
Target Value (Setpoint) Selection	
Number of selectable setpoints:	2
Number of PID settings:	2 (to be set for each setpoint)
Setpoint selection:	Voltage-free remote contact (External contact rating: 12V DC or more, 10mA or more)

UT37 Output: Universal Method (Output Type Selectable)

Output type:	Time proportional PID (relay output) Time proportional PID (voltage pulse output for driving external SSR) Continuous output PID (4 to 20mA DC output) ON/OFF (relay output)
Relay output contact rating:	250V AC, 3A (resistive load)
Voltage pulse output:	ON voltage Approx. 12V DC or more (load resistance: 60Ω or more) OFF voltage 0.1V DC or less
4 to 20mA DC output:	Load resistance of 600Ω or less, accuracy of ±0.3% of F.S., output updating period of 200 ms
Cycle time:	1 to 240 sec (relay and voltage pulse output)
Output high and low limits:	–5 to 105%

UT38 Output: Position Proportional PID Output Only

Output type:	Position proportional PID relay output Output updating period 100 ms
Relay output contact rating:	250V AC, 3A (resistive load)
Feedback resistance:	100Ω to 2.5KΩ (arbitrary)
Position proportional input resolution:	0.15 (display)
Dead band:	1.0 to 10.0% (of position signal span)
Relay gap:	0.1 to 0.5%
Output action selection:	Direct/reverse action selectable
AUTO/MAN selection:	Balanceless, bumpless selection
Output velocity limit:	0.0 to 100.0%/sec (0.0%/sec means OFF.)
Other functions:	Auto-tuning, key lock, input burn-out, and [SUPER].
Isolation:	Measured input and control output circuits are isolated from each other.

Alarm Function

Setting content:	Process variable high and low limits, deviation high and low limits, etc. (selectable for each point from among 20 types. Timer function can be specified)
Alarm value:	0 to 100% of the set range
Number of settings:	2
Output:	Relay output contact rating: 250V AC 1A (resistive load)
Display:	LED lamp display on the front panel

Environmental Condition

Normal operating condition

Ambient Temperature:	0 to 50°C
Ambient Humidity:	20 to 90% R.H. (non-condensing)
Reference Junction Temperature Compensation Error:	0 to 50°C: ±1°C
Magnetic Field:	400 AT/m or less
Warm-up Time:	30 min or more

Effects on operating conditions

Ambient Temperature Effect:	Input stability Within (±1μV/°C or ±0.01%/°C, whichever is greater) Output stability Within (4 to 20mA DC) ±0.05%/10V
Power Supply Variation:	Input stability Within (±1μV/10V or ±0.01%/10V, whichever is greater) Output stability Within (4 to 20mA DC) ±0.05% 10V

Transmit/storage conditions

Temperature:	–25 to 70°C
Humidity:	5 to 95% R.H. (non-condensing)

Construction, Dimensions, and Weight

Construction:	Dustproof, drip-proof construction (front panel)
Mounting:	Flush mounting
Case:	Plastic molding (ABS resin)
Dimension:	96W × 96H × 100D mm
Weight:	Approx. 1Kg

General Specifications

Insulation resistance:	Between each terminal and ground: 20 MΩ or more at 500 V DC
Withstand voltage:	Between power terminals and ground: 1500V AC for 1 min Between input terminals and ground: 1000 V AC for 1 min Between output terminals and ground: 1500V AC for 1 min
Supply voltage:	100 to 240V AC (universal power supply) (permissible supply voltage range: 90 to 250V AC)
Power frequency:	50/60 Hz common
Power consumption:	Approx. 12 A (100V)
Memory protection:	Nonvolatile memory

Recovery from Power Failure

Power failure of 2 sec or less	
	Instrument continues normal operation as if there were no power failure. Alarm with standby action enters standby action
Power failure of more than 2 sec	
Alarm	Alarm with standby action restart at the status of standby
Setting parameter	Resistered
Auto-tuning	Canceled
Control	For RST - 0 Operation continues before power failure For RST = 1 Controller enters MAN mode Control output is preset output value For RST = 2 Operation continues before power failure Control output is preset output value

If power failure occurs during setting using a key, error code *XX04* may appear.

Instruction Manual

UT37, UT38
Digital Indicating Controller
Operation Manual

CONTENTS

1. INTRODUCTION 2
2. HANDLING PRECAUTIONS 3
   2.1 Cleaning 3
   2.2 Component Names and Functions 4
   2.3 Cautions For Key Operation 6
3. KEY OPERATION 7
   3.1 Key Operation Rules 7
      3.1.1 Operation Display ① 8
      3.1.2 Operation Display ② 9
      3.1.3 Operation Display ③ 9
   3.2 Key Lock Confirmation 10
   3.3 Key Lock Release 10
4. PROCEDURE FOR SETTING AND CHANGING SETPOINT 12
5. OPERATION PARAMETER SETTING 14
   5.1 Procedure for Alarm 1 (A1) Setting 16
   5.2 Procedure for Alarm 2 (A2) Setting 17
   5.3 Procedure for Ratio (RT) Setting 18
   5.4 Procedure for Remote Bias (RBS) Setting 19
   5.5 Procedure for Remote/Local Mode Selection (R/L) Setting 20
   5.6 Procedure for "Super" Function ON/OFF (SC) Setting 21
   5.7 Procedure for Auto-tuning ON/OFF (AT) Setting 22
   5.8 Procedure for Dead Band (DB) Setting 23
   5.9 Procedure for Relay Hysteresis (HIY) Setting 24
   5.10 Procedure for (Main) Setpoint (SP) Setting 25
   5.11 Procedure for Secondary Setpoint (2.SP) Setting 26
   5.12 Procedure for Proportional Band (P) Setting 27
   5.13 Procedure for Integral Time (I) Setting 28
   5.14 Procedure for Derivative Time (D) Setting 29
   5.15 Procedure for Manual Reset (MR) Setting 30
   5.16 Procedure for ON/OFF Control Hysteresis (HY) Setting 31
   5.17 Procedure for Output High Limit Value (OH) Setting 32
   5.18 Procedure for Output Low Limit Value (OL) Setting 33
   5.19 Procedure for the Other Operation Parameter Setting 34
6. OPERATION 36
   6.1 Operation (RUN) Status at Power ON 36
   6.2 Changing Operation Parameter 36
   6.3 Changing Setpoint 36
   6.4 Main Setpoint (1.SP)/Secondary Setpoint (2.SP) Selection 37
   6.5 Auto/MAN Selection 38
   6.6 Output Value Operation in MAN mode 39
   6.7 RUN/STOP Selection 40
   6.8 LOCAL/REM Selection 40
   6.9 When Power is lost During Operation 42
   6.10 In The Case of Error Display 42
7. MAINTENANCE 43
   7.1 Replacement of Rubber Gasket for Dustproofing 44
   7.2 Control Output Relay Replacement 44
   7.3 Error Display 45

APPENDIX : OPERATION PARAMETERS LIST 46

YOKOGAWA ◆
Yokogawa Electric Corporation

IM 5B4B7-20E
1993. June. 2nd Edition

1. INTRODUCTION

As this instruction manual "Operation" is for operators operating controllers UT37 and UT38, it mainly describes handling and key operation. (See the table below.)

To understand all the functions and specifications, refer to instruction manual "Initial Setting Manual" (IM5B4B7-20E).

Operation Manual

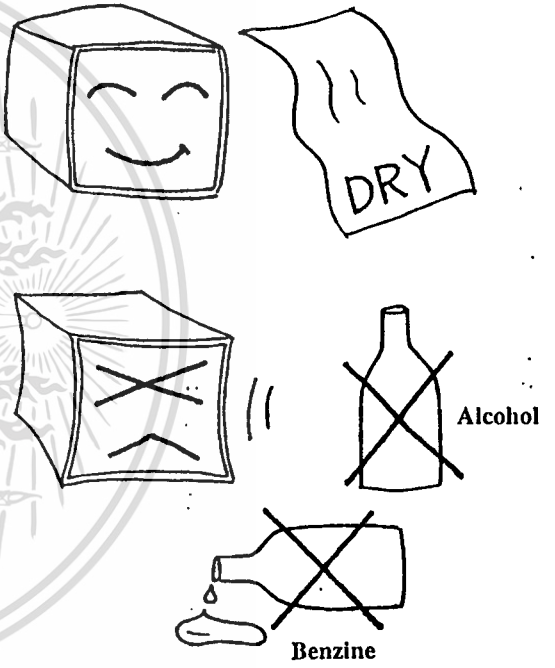
- ◎ Handling precautions
- ◎ Key operation
  - ● Setpoint setting
  - ● Operation parameter settingp
    - • Alarm setting
    - • PID constants, and others
  - ● Operation
    - • Start/Stop
    - • Mode selection, etc.
- ◎ Maintenance and processing during abnormality

Note: For further details, see the contents of this manual.
This manual does not describe setup parameters or setting procedures. For setup parameters, refer to instruction manual "Initial Setting Manual" (IM 5B4B7-01E).

2. HANDLING PRECAUTIONS

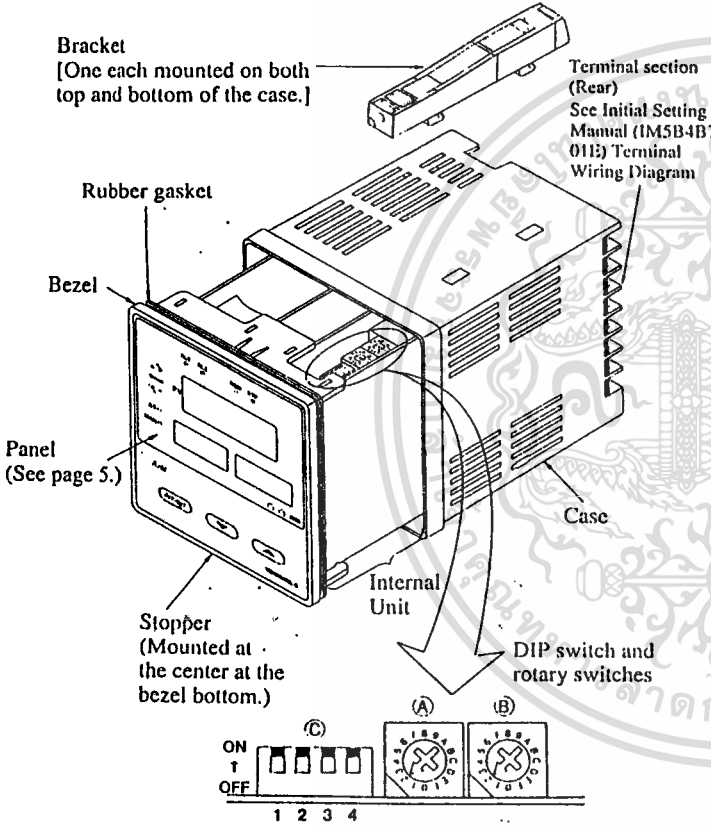
2.1 Cleaning

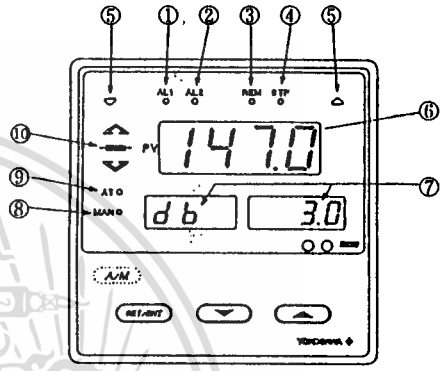
The front panel and keys should be softly cleaned using a dry cloth. Do not use solvents such as alcohol or benzine.



2.2 Component Names and Functions

- Controllers UT37 and UT38 are composed as shown in the figure below.





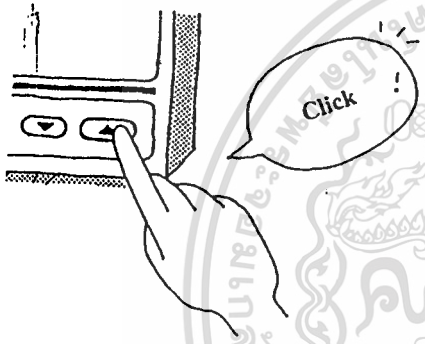
Key	Function
SET (ENT)	• Transfers each operation display panel (when pressed within three sec). • Alternatively transfers the operation display panel to the operation setting display panel and vice versa (when pressed for three sec or more). • Calls up each parameter setting display panel. • Registers numeric values.
▽	Changes displayed numeric values of target setpoint, parameter, and output value (in the manual operation mode). ▽ (down) key for decrement and △ (up) key for increment. These keys change the numerical value by one every time pressed, but when held down change with increasing speed.
△	
A/M	Used for selecting AUTO (automatic) or MAN (manual) operation.

No.	Display	Function
①	AL1 (Alarm 1 lamp)	Lights when alarm 1 is activated.
②	AL2 (Alarm 2 lamp)	Lights when alarm 2 is activated.
③	REM (Remote mode indicating lamp)	Lights in REM (remote setting) mode. [Extinguishes in LOCAL (local setting) mode.]
④	STP (Stop mode indicating lamp)	Lights in STP (operation stop) mode. [Extinguishes in RUN (operation) mode.]
⑤	(Output monitor)	Functions only for UT38. ▽ lights for L side output and △ for H side output.
⑥	8888 (PV display)	Displays measured value (PV).
⑦	888 / 8888 (Setpoint and parameter display)	Displays the setpoint (SP) and various parameters.
⑧	MAN (Manual mode execution display lamp)	Lights in MAN (manual operation) mode. [Extinguishes in AUTO (automatic operation) mode.]
⑨	AT (Auto Tuning execution display lamp)	Flashes during auto-tuning.
⑩	▲ ■ ▼ (Deviation monitor)	When deviation (PV - SP) is within ±1.0% of full scale (F.S.), ■ (green) lights. If it is over +1.0% of F.S., ▲ (orange) lights. If it is under −1.0% of F.S., ▼ (orange) lights. These are displayed only on operation display panel.

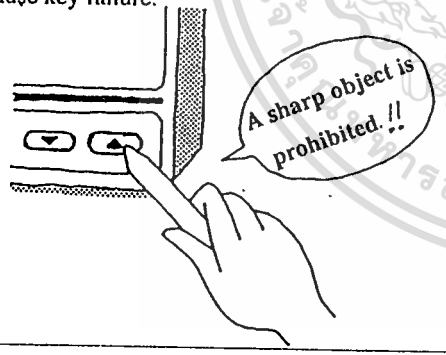
2.3 Cautions for Key Operation

When operating keys, exercise caution for the following two points:

① The keys of UT37 and UT38 click. Press the keys so that the finger feels a click.



② Do not depress the keys using a sharp object because it may cause key failure.

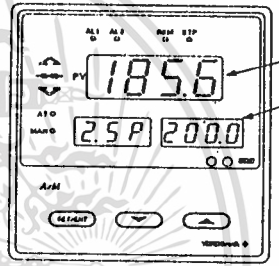


3. KEY OPERATION

3.1 Key Operation Rules (Operation display panels and operation parameter setting display panels)

Operation Display Panels

Three types of operation display panels 1, 2 and 3 are provided. However, their contents vary by setup parameter setting. (See page 8.)

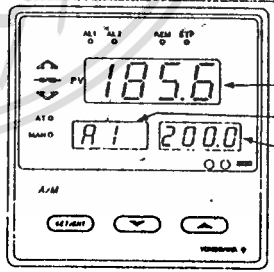


Measured value (PV) (Always displayed)

① Setpoint (SP) (in automatic (AUTO) mode)
or
② Control output value (in manual (MAN) mode)
or
③ Time (when the timer function is used)

- Display panels can be alternately changed by pressing (SET/ENT) key for three sec. or more.

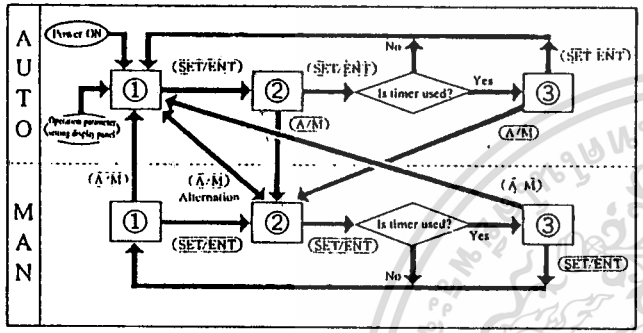
Operation Parameter Setting Display Panel



Measure value (PV) (Always displayed)
Displays an operation parameter symbol.
Displays an operation parameter set value

Changing Operation Displays

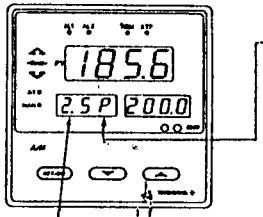
①, ② and ③ in the figure below show each operation display panel No. (Note: If SET/ENT key is pressed within three sec.)



3.1.1 Operation Display Panel ①

Displays measured value (PV) and setpoint (SP).

- In local mode, setpoint (SP or 2.SP) can be changed using ▼ and ▲ keys. (Registration using SET/ENT key is needed. See page 12.)



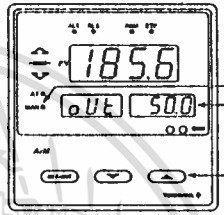
In local mode, either SP or 2.SP is displayed by turning the DIP switch No.3 to ON or OFF, or by selecting SP/2.SP using an external contact. Refer to "Initial Setting Manual" (IM5B4B7-01E).

- R.SP is displayed in remote mode only (when optional code "/RSP" is specified). At this time, remote setpoint (R.SP) cannot be changed with ▼ and ▲ keys.
- In the operation display panel ①, if MAN (manual) mode is selected by pressing A/M key or if SET/ENT key is pressed, the controller displays the operation display panel ② (MAN).

3.1.2 Operation Display Panel ②

Displays measured value (PV) and control output.

- In the operation display panel ②, if MAN mode is selected the control output can be changed with ▼ and ▲ keys. (No registration is necessary using SET/ENT key.)



When MAN lamp lights (manual operation), the displayed value can be changed using the ▼ and ▲ keys to show the control output.

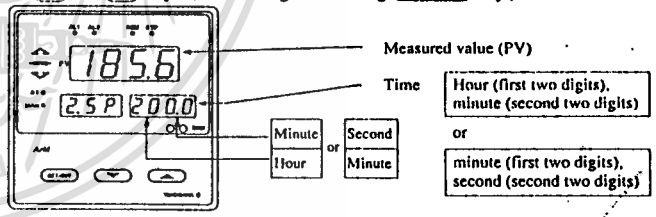
- In operation display panel ②, when AUTO mode is selected by pressing A/M key, the panel returns to the operation display panel ①.
- When SET/ENT key is pressed in the operation display panel ②, the panel changes to the operation display panel ③ (Only when the timer is used; refer to "Initialization Manual" IM5B4B7-01E) or returns to operation display panel ①.

3.1.3 Operation Display Panel ③

Displays measured value (PV) and time (timer function).

Note: Operation display panel ③ appears only when the timer function is used. (See page 53 of "Initialization Manual" IM5B4B7-01E.)

- In operation display panel ③, time (timer function) value can be changed using ▼ and ▲ keys. (Must be registered using SET/ENT key.)



- Changeable range of time is (0).(0) to 99.59 (Either hour/minute or minute/second)
- When the operation mode is set to MAN (manual operation) using A/M key, the panel transfers to the operation display panel ②. When SET/ENT key is pressed, the panel transfers to operation display panel ①.

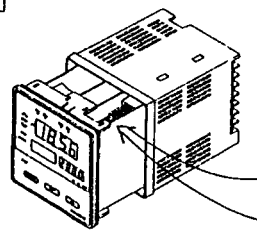
3.2 Key Lock Confirmation

As this controller has a key lock function to prevent mis-operation, the controller occasionally does not operate in spite of key operation. When the required operation cannot be executed because of key lock, release the key lock before key operation. The following five types of key lock are provided.

dAt	(▲), (▼) Key lock	All parameter setting and change by key operation are impossible.
AMn	(A/M) Key lock	AUTO/MAN transfer using (A/M) key is impossible.
rmL	Remote/Local switch lock	REM/LOCL switch using key parameters is impossible.
PAr	Operation parameter setting and changing lock	Setting and change of operation parameters using keys are impossible
PId	PID parameter setting/changing lock	Setting and change of P, I, D, MR, HY, OH, OL, 2.P, 2.I, 2.D, 2.MR, 2.HY, 2.OH, and 2.OL among operation parameters are impossible.

3.3 Key Lock Release

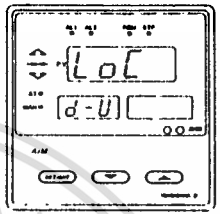
1



① After turning OFF power, pull out the internal unit. (See page 4.)

② Set the DIP switch No.4 to OFF.

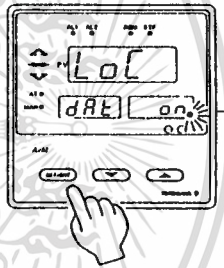
2



③ Restore the internal unit in place and turn power ON.

"LOC" is displayed.

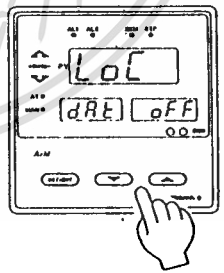
3



④ Press (SET/ENT) key to call up a key lock code to be released.

If "ON"(ON) is displayed, the controller is locked.

4



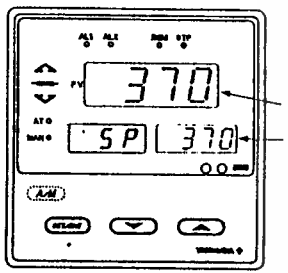
⑤ Lock is released by pressing (▼) or (▲) keys to display 'OFF' and registering using (SET/ENT) key.
After releasing lock, set the DIP switch No.4 to ON.
(Refer to [I].)

4-57

4. PROCEDURE FOR SETTING AND CHANGING SETPOINT

1

- Display the operation display panel ①. (See page 8)

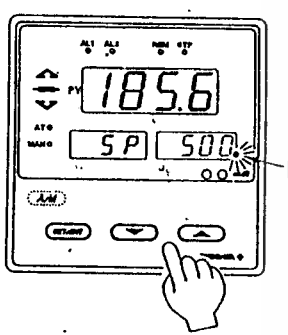


Measured value (PV)

Setpoint (Note 1)

2

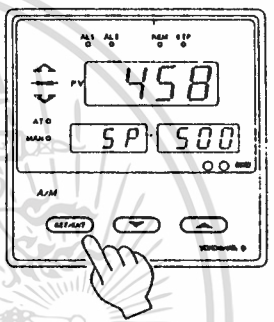
Set the required setpoint using (▼) and (▲) keys.



[Decimal point is flashing.]

3

Press (SET/ENT) key once. (Note 2)
A new setpoint has been set. (In this case, the decimal point stops flashing.)



— Cautions —

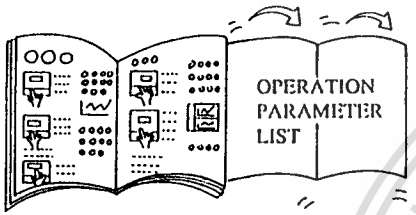
Note 1: When [2.SP] appears in step [1], it means that the secondary setpoint is to be set.

Note 2: In step [3], do not press (SET/ENT) key for three sec or more. (See 2.1 "Key Operation Rules" (page 7).)
When (SET/ENT) key is pressed twice in step [3], controller displays the operation display panel [2]. (See page 9.)

ค-58

5. OPERATION PARAMETER SETTING

This chapter describes the procedures for setting operation parameters. At the time of setting, it is convenient to consult the operation parameter list (page 47, 48) attached at the end of this manual).



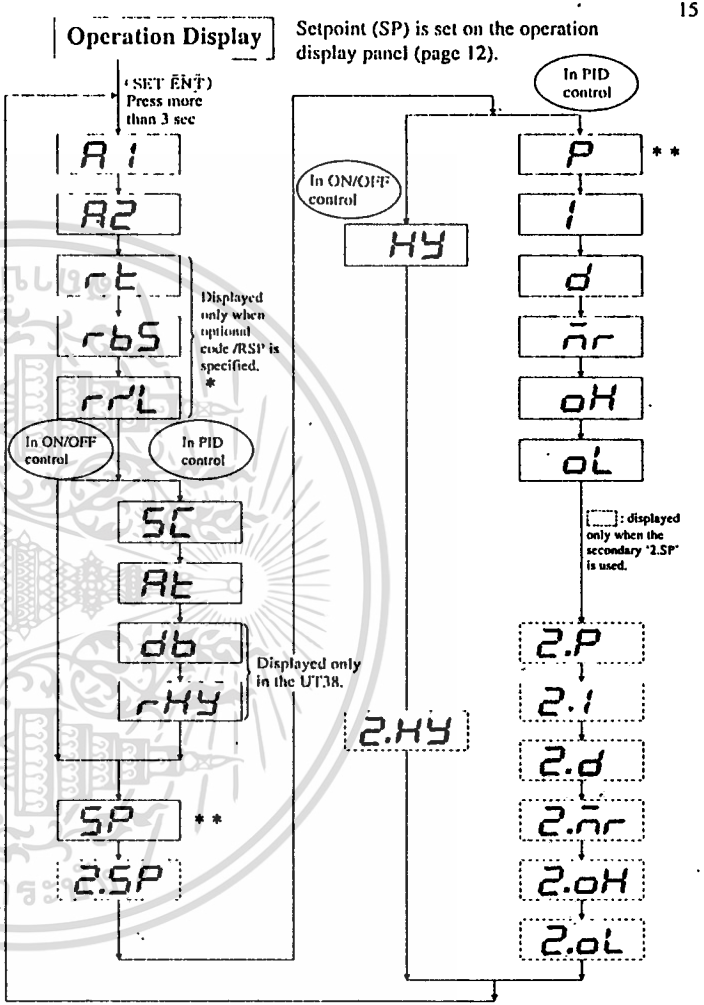
— Notes for operation parameter setting —

Note 1 As described in 3.1 "Key Operation Rules", set parameters after calling up the operation parameter setting display panel by pressing (SET/ENT) key continuously for three sec or more with the operation display panel on the screen.

Note 2 Operation parameter setting display panels (code display) vary depending on presence or not of optional specifications, use or not of the secondary SP(2. SP), and if the controller is UT37 or UT38. (See the figure at the right.)

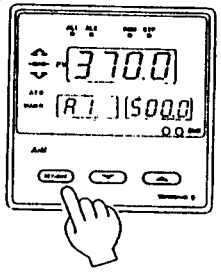
Note 3
- If another operation parameter setting is not needed after one parameter setting has been completed, press (SET/ENT) key for three sec or more in succession to return the display to the operation display panel ①.
- If another operation parameter setting follows one parameter setting, press (SET/ENT) key one-time for each, to display the required parameter setting display panels.
- Set each operation parameter by referring to the setting procedure (pages 16 to 35).

Note 4 For detailed explanation of each operation parameter function, see pages 29 to 35 of "Initial Setting Manual" (IM5B4B7-01E).



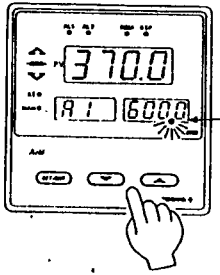
5.1 Procedure for Alarm 1 [A1] Setting

1



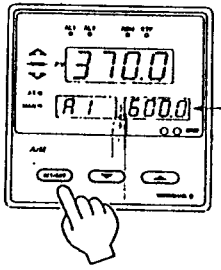
Press (SET/ENT) key for three sec or more with an operation display panel on the screen.
(Obtain the display shown in the left figure. Confirm [A1].)

2



Set the required alarm 1 set value using (▼) and (▲) keys.
At this time, the decimal point flashes (Note).

3



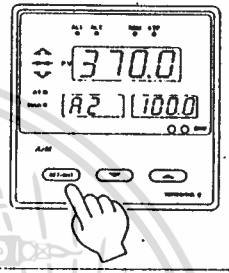
Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).]

Note: Refer to [Note 3] on page 14 of "Notes for operation parameter setting."

Note: If the value is returned to the value before change, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).

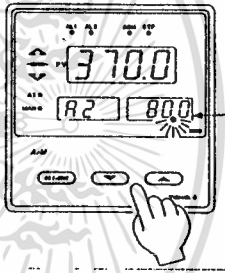
5.2 Procedure for Alarm 2 [A2] Setting

1



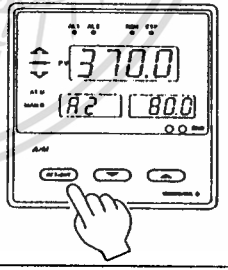
- Press (SET/ENT) key for three sec or more with the operation display panel on the screen to display alarm 1 setting display panel.
- Press (SET/ENT) key once again (within three sec).
(Obtain the display shown in the left figure. Confirm [A2].)

2



Set the required alarm 2 set value using (▼) and (▲) keys.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



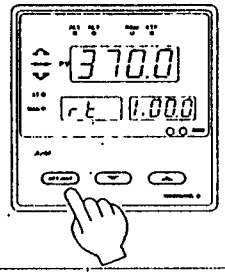
Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer)].

Note: Refer to [Note 3] at page 14 of "Note for operation parameter setting."

5.3 Procedure for Ratio (RT) Setting

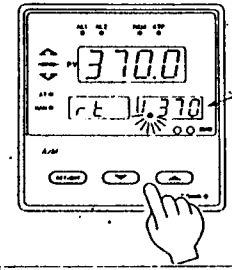
(Displayed only when /RSP is specified)

1



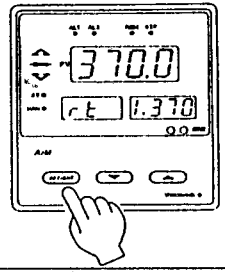
- Press (SET/ENT) key for three sec or more to display the alarm 1 setting display panel with the operation display panel on the screen.
- Press (SET/ENT) key two times in succession (within three sec for each), only when /RSP is specified.
  (Obtain the display shown in the left figure. Confirm [rt].)

2



Set the required ratio value using (▼) and (▲) keys.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



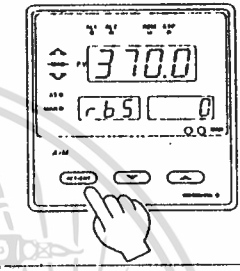
Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).]

Note: Refer to [Note 3] at page 14 of "Note for operation parameter setting."

5.4 Procedure for Remote Bias (RBS) Setting

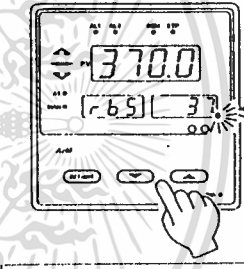
(Displayed only when /RSP is specified.)

1



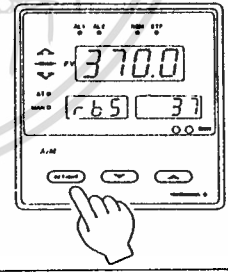
- Press (SET/ENT) key for three sec or more to display the alarm 1 setting display panel with the operation display panel on the screen.
- Press (SET/ENT) key three times in succession (within three sec for each), only when /RSP is specified.
  (Obtain the display shown in the left figure. Confirm [rbS].)

2



Set the required ratio value using (▼) and (▲) keys.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).]

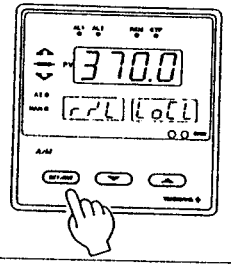
Note: Refer to [Note 3] at page 14 of "Note for operation parameter setting."

5.5 Procedure for Remote/Local Mode Selection (R/L)

(Displayed only when /RSP is specified)

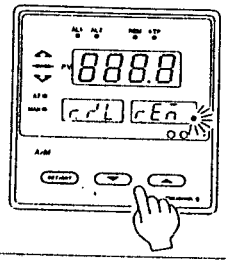
This operation parameter is used for remote/local mode selection.

1



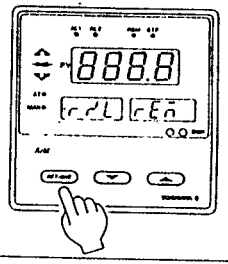
The operation parameter setting display panel appears after SET/ENT key is pressed for three sec or more with an operation display panel on the screen.
Press SET/ENT key a few times (within three sec for each) to obtain the display shown in the left figure. (Confirm r-L.)

2



Display either LOCL (local) or REM (remote) using ▼ and ▲ keys. (Either is displayed alternately.)
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



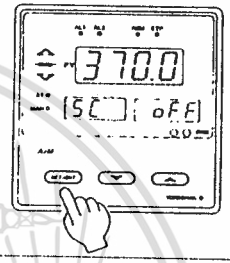
After the required mode is displayed, enter the required mode by pressing the SET/ENT key (within three sec).
At this instant, the mode is selected. [The decimal point extinguishes.]

Note: Refer to Note 3 at page 14 of "Note for operation parameter setting."

5.6 Procedures for "Super" Function ON/OFF

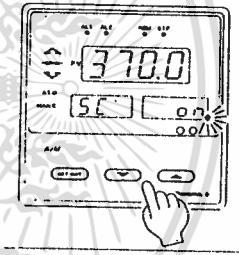
Note: • "Super" function cannot be selected in ON/OFF control
• "Super" function is effective only for PID control. Not effective for P, PI, and PD control.

1



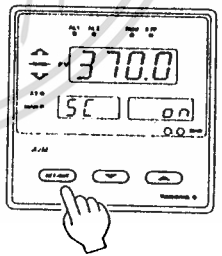
The operation parameter setting display panel appears after SET/ENT key is pressed for three sec or more with an operation display panel on the screen.
Press SET/ENT key a few times (within three sec for each) to obtain the display shown in the left figure. (Confirm SC.)

2



Display either "ON" or "OFF" using ▼ and ▲ keys.
Display "ON" for using "Super" function.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



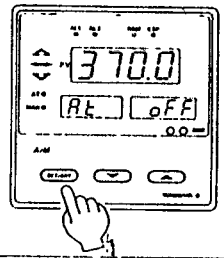
Press SET/ENT key once. Setting is completed. (Note)
At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).

Note: Refer to Note 3 at page 14 of "Note for operation parameter setting."

5.7 Procedure for Auto-Tuning ON/OFF

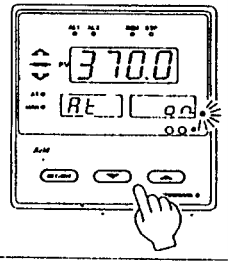
Note: Auto-Tuning cannot be executed in ON/OFF control.

1



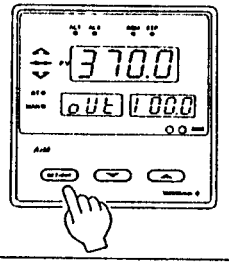
The operation parameter setting display panel appears after (SET/ENT) key is pressed for three sec or more with an operation display panel on the screen.
Press (SET/ENT) key a few times (within three sec for each) to obtain the display shown in the left figure. (Confirm AT.)

2



Display either "ON" or "OFF" using (▼) and (▲) keys. ("ON" is displayed when auto-tuning is required.)
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



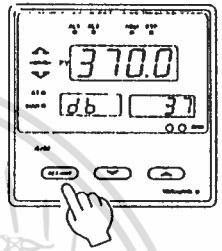
Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, output display of the operation display panel appears.]

Note: Refer to Note 3 at page 14 of "Note for operation parameter setting."

5.8 Procedure for Dead Band (DB) Setting

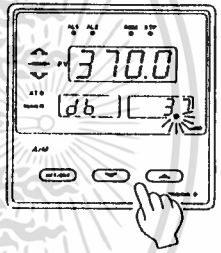
Note: Dead band (DB) is provided in UT38 only, not in UT37.

1



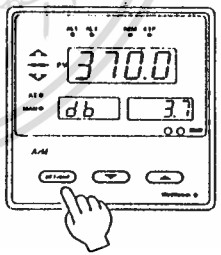
The operation parameter setting display panel appears after (SET/ENT) key is pressed for three sec or more with an operation display panel on the screen.
Press (SET/ENT) key a few times (within three sec for each) to obtain the display shown in the left figure. (Confirm db.)

2



Set the required dead band value using (▼) and (▲) keys.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



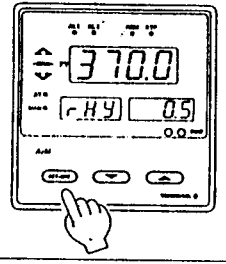
Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).]

Note: Refer to Note 3 at page 14 of "Note for operation parameter setting."

5.9 Procedure for Relay Hysteresis (RHY) Setting

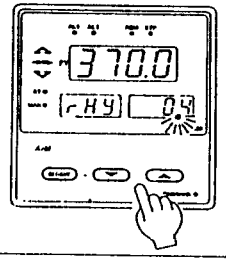
Note: Relay hysteresis (RHY) is provided in UT38 only, not in UT37.

1



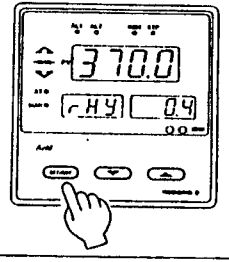
The operation parameter setting display panel appears after (SET/ENT) key is pressed for three sec or more with an operation display panel on the screen.
Press (SET/ENT) key a few times (within three sec for each) to obtain the display shown in the left figure. (Confirm rHY.)

2



Set the required relay hysteresis value using (▼) and (▲) keys.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



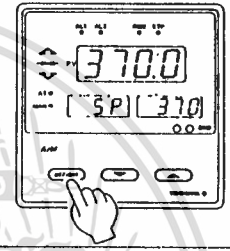
Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).]

Note: Refer to [Note 3] at page 14 of "Note for operation parameter setting."

5.10 Procedure for Main Setpoint (SP) Setting

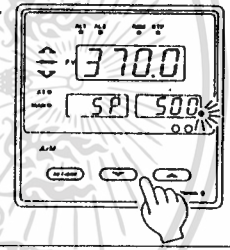
Note: • Setpoint (SP) can be changed by operations in the operation display panel ① (but in local mode).
This parameter should be used for changing the (main) setpoint (SP) during operation with the secondary setpoint setting.

1



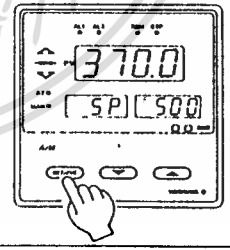
The operation parameter setting display panel appears after (SET/ENT) key is pressed for three sec or more with an operation display panel on the screen.
Press (SET/ENT) key a few times (within three sec for each) to obtain the display shown in the left figure. (Confirm SP.)

2



Set the required setpoint (SP) using (▼) and (▲) keys.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



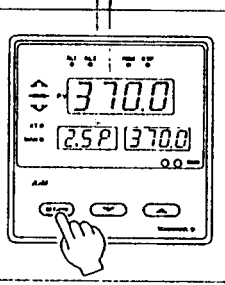
Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).]

Note: Refer to [Note 3] at page 14 of "Note for operation parameter setting."

5.11 Procedure for the Secondary Setpoint (2.SP) Setting

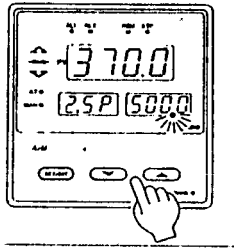
Note: ① The secondary setpoint (2.SP) can also be changed on the operation display panel ① (in local mode) during operation with the secondary setpoint (2.SP) setting.
(This parameter should be used for changing the secondary setpoint (2.SP) during operation with the (main) setpoint (SP) setting.)
② Displayed only when the secondary setpoint is used.

1



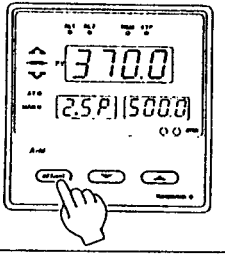
The operation parameter setting display panel appears after (SET/ENT) key is pressed for three sec or more with an operation display panel on the screen.
Press (SET/ENT) key a few times (within three sec for each) to obtain the display shown in the left figure. (Confirm 2.SP)

2



Set the required secondary setpoint (2.SP) using (▼) and (▲) keys.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



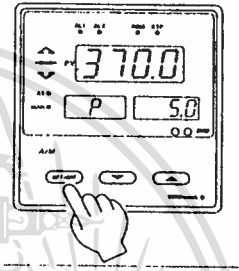
Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).]

Note: Refer to Note 3 at page 14 of "Note for operation parameter setting."

5.12 Procedure for Proportional Band (P) Setting

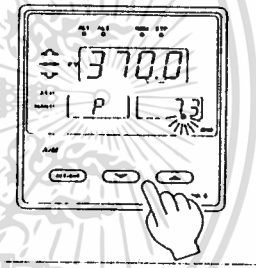
Note: Proportional band setting display panel is not displayed in ON/OFF control.

1



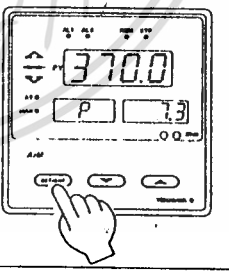
The operation parameter setting display panel appears after (SET/ENT) key is pressed for three sec or more with an operation display panel on the screen.
Press (SET/ENT) key a few times (within three sec for each) to obtain the display shown in the left figure. (Confirm P .)

2



Set the required value of the proportional band using (▼) and (▲) keys.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



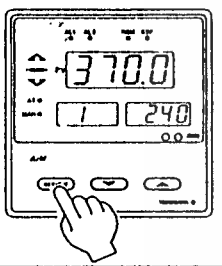
Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).]

Note: Refer to Note 3 at page 14 of "Note for operation parameter setting."

5.13 Procedure for Integral Time (I) Setting

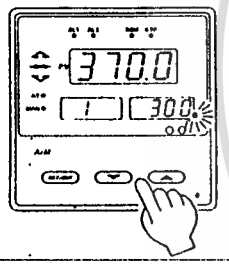
Note: Integral time (I) setting display panel is not displayed in ON/OFF control.

1



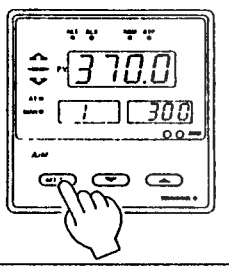
The operation parameter setting display panel appears after (SET/ENT) key is pressed for three sec or more with an operation display panel on the screen.
Press (SET/ENT) key a few times (within three sec for each) to obtain the display shown in the left figure. (Confirm [I].)

2



Set the required integral time value using (▼) and (▲) keys.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



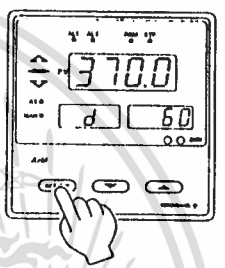
Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).]

Note: Refer to [Note 3] at page 14 of "Note for operation parameter setting."

5.14 Procedure for Derivative Time (D) Setting

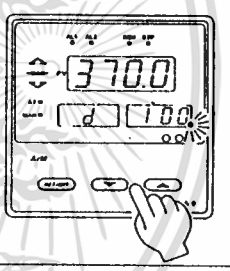
Note: Derivative time (D) setting display panel is not displayed in ON/OFF control.

1



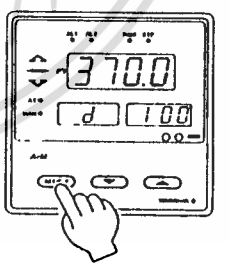
The operation parameter setting display panel appears after (SET/ENT) key is pressed for three sec or more with an operation display panel on the screen.
Press (SET/ENT) key a few times (within three sec for each) to obtain the display shown in the left figure. (Confirm [d].)

2



Set the required derivative time value using (▼) and (▲) keys.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).]

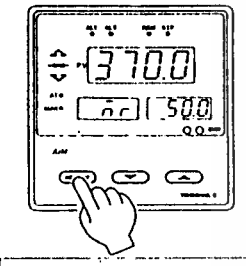
Note: Refer to [Note 3] at page 14 of "Note for operation parameter setting."

ค-66

5.15 Procedure for Manual Reset Value (MR) Setting

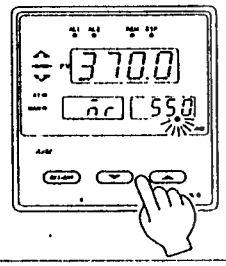
Note: Manual reset value (MR) is effective only when integral time (I) is turned OFF.

1



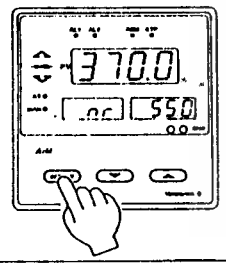
The operation parameter setting display panel appears after (SET/ENT) key is pressed for three sec or more with an operation display panel on the screen.
Press (SET/ENT) key a few times (within three sec for each) to obtain the display shown in the left figure. (Confirm [mr].)

2



Set the required manual reset value using (▼) and (▲) keys.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



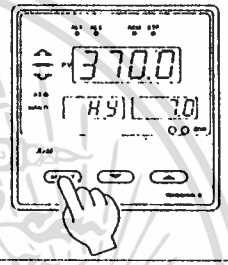
Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).]

Note: Refer to Note 3 at page 14 of "Note for operation parameter setting."

5.16 Procedure for ON/OFF Control Hysteresis (HY) Setting

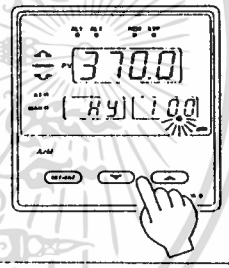
Note: ON/OFF control hysteresis (HY) is displayed in ON/OFF control only.

1



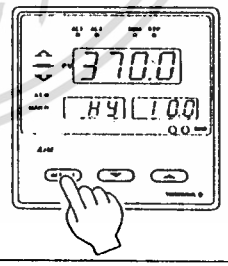
The operation parameter setting display panel appears after (SET/ENT) key is pressed for three sec or more with an operation display panel on the screen.
Press (SET/ENT) key a few times (within three sec for each) to obtain the display shown in the left figure. (Confirm [HY].)

2



Set the required ON/OFF control hysteresis value using (▼) and (▲) keys.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).]

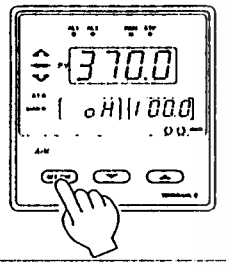
Note: Refer to Note 3 at page 14 of "Note for operation parameter setting."

จ-67

5.17 Procedure for Output High Limit Value (OH) Setting

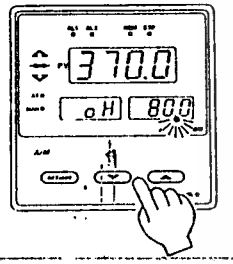
Note: Output high limit (OH) is not displayed in ON/OFF control.

1



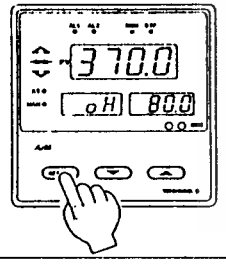
The operation parameter setting display panel appears after (SET/ENT) key is pressed for three sec or more with an operation display panel on the screen.
Press (SET/ENT) key a few times (within three sec for each) to obtain the display shown in the left figure. (Confirm oH.)

2



Set the required output high limit value using (▼) and (▲) keys.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



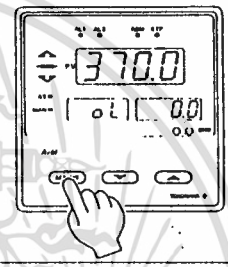
Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).]

Note: Refer to Note 3 at page 14 of "Note for operation parameter setting."

5.18 Procedure for Output Low Limit Value (OL) Setting

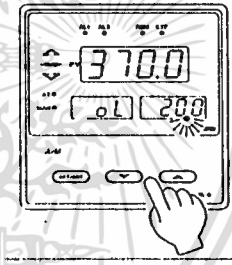
Note: Output low limit (OL) is not displayed in ON/OFF control.

1



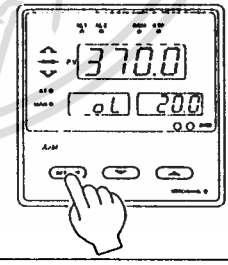
The operation parameter setting display panel appears after (SET/ENT) key is pressed for three sec or more with an operation display panel on the screen.
Press (SET/ENT) key a few times (within three sec for each) to obtain the display shown in the left figure. (Confirm oL.)

2



Set the required output low limit value using (▼) and (▲) keys.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3



Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).]

Note: Refer to Note 3 at page 14 of "Note for operation parameter setting."

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.19 Procedures for the Other Operation Parameter Setting

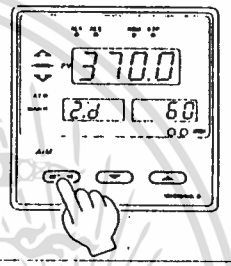
- The other operation parameters include the following.

Table 5.1

Display	Code	Operation parameter setting items
2.P	2.P	Proportional band for the secondary setpoint (2.SP)
2.I	2.I	Integral time for the secondary setpoint (2.SP)
2.d	2.D	Derivative time for the secondary setpoint (2.SP)
2.MR	2.MR	Manual reset value for the secondary setpoint (2.SP)
2.HY	2.HY	ON/OFF control hysteresis for the secondary setpoint (2.SP)
2.oH	2.OH	Output high limit value for the secondary setpoint (2.SP)
2.oL	2.OL	Output low limit value for the secondary setpoint (2.SP)

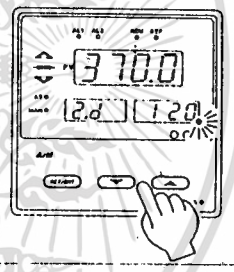
- These parameters should be set after the above codes are confirmed on each parameter setting display panel.
- Operate the keys to set parameters according to steps [1], [2] and [3] on the page at the right.

1]



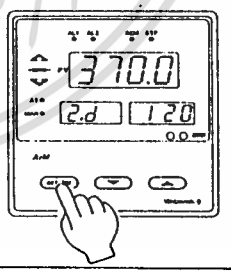
The operation parameter setting display panel appears after (SET/ENT) key is pressed for three sec or more with an operation display panel on the screen.
Press (SET/ENT) key a few times (within three sec for each) to obtain the display shown in the left figure. (Confirm the display of required parameter.)

2]



Set the required parameter value using (▼) and (▲) keys.
[At this time, the decimal point flashes. See Note of p.16 below.]

3]



Press (SET/ENT) key once. Setting is completed.
[At this time, the decimal point either lights or extinguishes (when the setpoint is an integer).]

Note: Refer to Note 3 at page 14 of "Note for operation parameter setting."

6. OPERATION

Notice

Refer to page 6 of the "Initial Setting Manual" (IM5B4B7-01E) to completely prepare for starting operation, such as mounting, wiring and parameter setting, etc.

6.1 Operation (RUN) Status at Power ON

- The UT37 or UT38 controllers enter "RUN" status when power is turned ON. At this time, the controller is in AUTO mode.
- However, the controllers enter "STOP" status when external contact terminal ⑩ ⑪ is ON (closed).
  In this case, the STP lamp lights and the control output value is a preset output value. (See page 49 of "Initial Setting Manual" IM5B4B7-01E.)
- Controllers UT37 and UT38 have no power switch. If necessary, prepare one outside of the controllers.
- If failures are found while power is supplied, each faulty content is displayed. If the operation display panel ① (or setup parameter alarm 1 setting display panel) is not presented while power is supplied, refer to page 42.

6.2 Changing Operation Parameter

- Refer to pages 16 to 35.
- As for the operation parameter values when controllers are shipped from the factory, refer to "Operation Parameters List" at the end of this manual.

6.3 Changing Setpoint (SP or 2.SP)

- Use the operation display panel ① (See p.8 and p.12)

Note :

Selection of External Contact (DI) Terminal Function

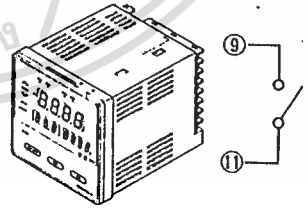
- The function of external contact terminals varys if 2.SP is used.
  When 2.SP is used, what function should be set on the DI terminals is selected by DI selection parameter (DIS).

DI Terminal No.	When 2.SP is not set	When 2.SP is set
⑨	AUTO/MAN selection	1.SP/2.SP selection
⑩	RUN/STOP selection	(I) RUN/STOP selection (II) AUTO/MAN selection
⑪	COM Terminal	

(I) RUN/STOP selection at DIS = 0
(II) AUTO/MAN selection at DIS = 1

6.4 Main setpoint (1.SP)/secondary setpoint (2.SP) selection

- 1.SP/2.SP selection can be performed using external contact terminals.



OFF (Open) : 1.SP
ON (Close) : 2.SP
Volt-free contact (Contact capacity: 12V DC, 10mA or more)

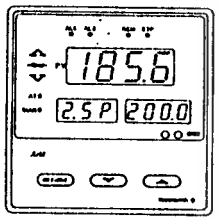
ค-70

6.5 AUTO (Automatic)/MAN (Manual) Selection

- AUTO/MAN selection can be performed using (A/M) key and external contact terminals. (See the figure below.)

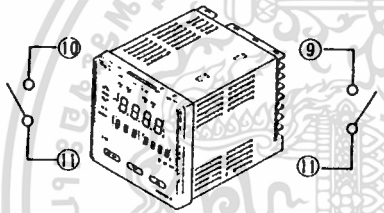
  Note: The external contact has priority over key operations. Therefore, MAN (manual) cannot be selected using (A/M) key when the contact is ON (closed).

● Mode selection by keys
During MAN (manual) operation, MAN lamp lights.



① Selected by (A/M) key. ((SET/ENT) key operation is not necessary.)

● Selection with an external contact



OFF (Open) : MAN (Manual)
ON (Close) : AUTO (Automatic)
Volt-free contact
(Contact rating; 12V DC, 10mA or more)

See Note of p.37 to select DI terminal No. (⑩– ⑪ or ⑨– ⑪)

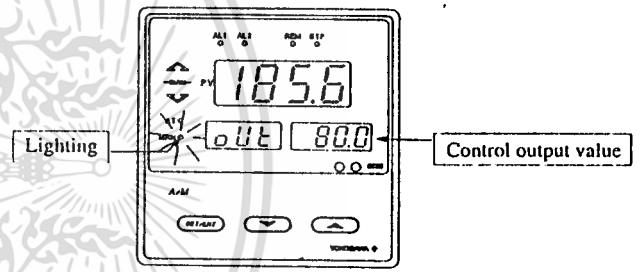
- Operation display panels ①, ② and ③ transfer as shown in "Changing of Operation Display" on page 8 by switching AUTO/MAN.
- In MAN mode, MAN lamp lights.
- In AUTO mode, MAN lamp extinguishes and the internally computed control output value is output.

6.6 Output Value Operation in MAN (Manual) Mode

- Perform operation on the operation display panel ②. (Immediately after MAN is selected, the operation display panel always transfers to the display panel ②. See "Changing Operation Display Panels" on page 8.

  Note: Confirm, however, that MAN lamp lights showing MAN mode.

- The value displayed in the operation display panel ② is the control output value.

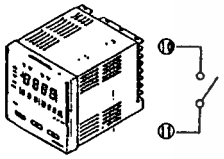


Control output value can be changed using (▼) and (▲) keys. (Displayed value is the control output value.)

6.7 RUN/STOP Selection

- RUN/STOP can be selected only by the external contact terminal.
- In RUN mode, STP lamp extinguishes, and the internally computed control output is output in AUTO mode. When in MAN mode, MAN lamplights, and output value can be changed using ▽ and △ keys.
- In STOP mode, STP lamp lights, and Preset output is output.

● **Selection with an external contact**

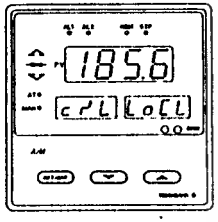


OFF (Open) : RUN
ON (Close) : STOP
Volt-free contact (Contact capacity: 12V DC, 10mA or more)

6.8 LOCAL/REM selection

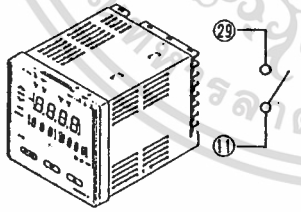
- LOCAL/REM selection can be performed using key operation and external contact terminals.

● **Selection by keys**
During REM mode, REM lamp lights.



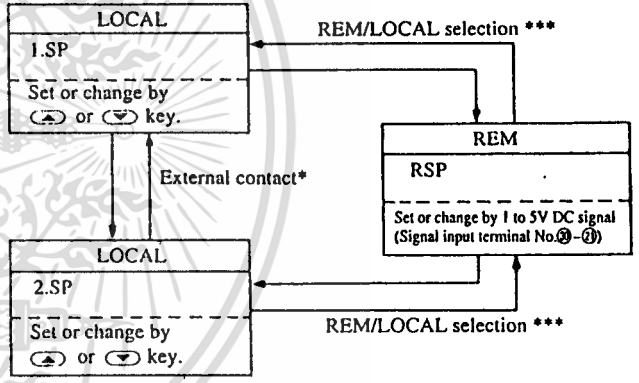
LOCAL/REM is selected by operation parameter (R/L). (See p.20.)

● **Selection with an external contact**



OFF (Open) : LOCAL
ON (Close) : REM
Volt-free contact (Contact capacity: 12V DC, 10mA or more)

- When external contact is OFF (Open), REM mode is selected by key operation or communication.
- When external contact is ON (Close), LOCAL mode cannot be selected by key operation or communication. External contact must be OFF (Open) to select LOCAL mode.
- In REM mode, REM lamp lights. In LOCAL mode, REM lamp extinguishes. Setpoint is selected in REM/LOCAL mode as following figure.



* Selected by external contact (No.⑨ – ⑪)
** 2.SP is set by DIP switch No.3. See p.11 of Initial Setting Manual (IM5B4B7-01E).
*** Selected by external contact (⑳– ⑪) or key operation.

9-72

6.9 When Power Is Lost During Operation

Momentary power failure in which power is lost for less than 20 ms have no effect on UT37/UT38 operation (operation continues normally).

In the case that power failure is for 20 ms or more, operation after recovery is as follows.

- Power failure of less than 2 sec
  Operation continues normal operation as if there were no power failure. Alarm with standby action enters standby action.

- Power failure of 2 sec or more
  [Alarm]
  Alarm with standby action restarts at the status of standby.
  [Setting parameters]
  Set parameters are kept resistered
  [Auto-tuning]
  Auto-tuning is canceled.
  [Control]
  One of following occurs in accordance with Restart Code (RST).
  0 : Controller continues the operation before power failure.
  1 : Controller enters MAN mode.
  Output applies the preset output value.
  2 : Controller continues the operation before power failure.
  Output applies the preset output value.

(Note) If power failure occurs during setting using a key, error code "XXOH" may appear.

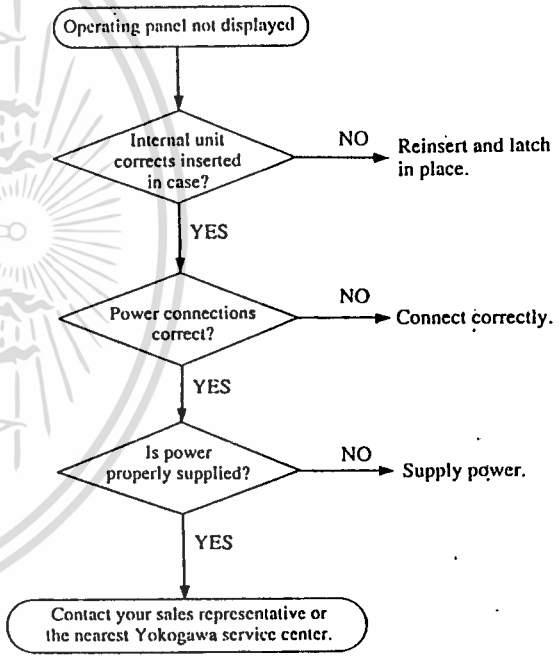
6.10 In The Case of Error Display

Respond to errors as indicated in the individual action entries of p.45.

7. MAINTENANCE

If the operating display panel is not displayed on the UT37 or U38 when power is applied, take action according to the following flowchart. If you suspect a serious problem, contact your sales representative or the nearest Yokogawa service center.

Troubleshooting flowchart



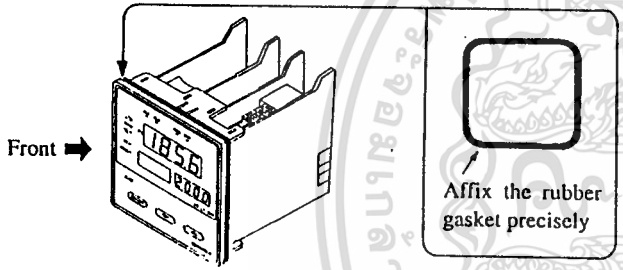
7.1 Replacement of Rubber Gasket for Dustproofing

44

Although the life of the rubber gasket for dustproofing is at least five or six years under normal operating conditions, when it deteriorates it should be replaced.

The part number and sales unit of the rubber gasket are as follows.

Type	Part number	Sales unit
UT37, UT38	B9877AJ	1 peace



Note: Turn the power OFF when removing the internal unit.

7.2 Control Output Relay Replacement

If the control output relay deteriorates it should be replaced.

The UT37 and UT38 use DSP1-DC12V relays (Matsushita Electric).

They may be ordered from your YOKOGAWA SALES REPRESENTATIVE or MATSUSHITA ELECTRIC OFFICES.

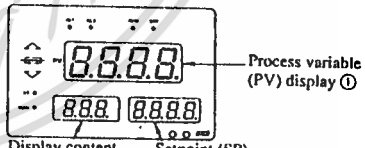
7.3 Error Display

45

Display position (Note1)	Error content	Error code	Action to be taken	PV status	Output status
①	Input burnout	b.oUt	Check Thermocouple or RTD connections	105%	Preset output
①	Over-scale (105% or more of measurement range)	oUr	Check whether measurement input range is appropriate and whether sensor is properly connected.	105%	Control continues with input at 105%
①	Under-scale (-5% or less of measurement range)	-oUr		-5%	Control continues with input at -5%
①	RAM error	FAIL	Request repair	—	Per setting of DIP switch No.2.
①	ROM error	FAIL			
①	Program overrun	FAIL			
①	System data error	E002			
①	Output type selection error (if any code other 0 to 3 is selected)	E003	Check rotary switch position, and correct the setting.		
③	EEPROM protect error	XX01 (Note 2)	Request repair		
③	Input range data error	XX02	Reset measurement input range	Normal	Manual output value
③	Set parameter error	XX04	Check parameters, and correct setups.		
③	Backup data error	XX10			
①	Reference junction compensation failure	rJC (Note 3)	Request repair	PV without RJC	Normal
②	EEPROM error	Display content indicator flashes.		Normal	Normal
—	Sub-CPU error	All OFF		—	Per setting of DIP swich No.2
①	Auto-tuning time-out	E200	Retry AT with another condition again.	Normal	Control continues using PID constants from before Auto-tuning
①	A/D converter error	E300	Request repair	105%	Preset output
③	Exceeding of remote setpoint limit	Limit value is displayed.	Check whether the remote setpoint limit value is correct and whether remote setpoint input is properly connected	Normal (*1)	Normal (forSP's limit)

Note 1: The arrangement of the display unit is as follows:

*1: (SP value is limit value)

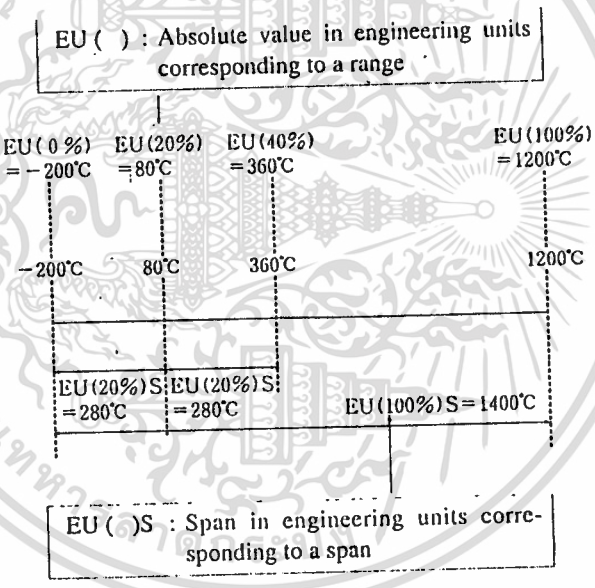


Note 2: xx stands for symbol (value) of the operating power frequency and option designation status.
Note 3: Measured value and rJC are displayed alternately.

APPENDIX: OPERATION PARAMETERS LIST

- Refer to the following list when setting each parameter according to Chapter 5 "OPERATION PARAMETER SETTING".
- Among units presented in the list, some presentations are specific to the UT37 and UT38, and are described below.

EU ( ) and EU ( )S are shown below (if the range is –200 to 1200°C)



Operation Parameter List

Display	Setting Item	Setting Range	Initial set value	Customer's set value	Reference page
A1 (A1)	Alarm 1	• EU (0%) to EU (100%) for PV (measured value) alarm • EU (0%) S to EU (100%) S for deviation alarm • OFF or 0.00 to 59.99 min/sec (or hour/min) for A1 timer	EU (100%) as PV high limit alarm		P.30
A2 (A2)	Alarm 2		EU (0%) as PV low limit alarm		P.30
rt (RT)	Ratio	0.000 ~ 9.999	1.000		P.30
rbS (RBS)	Remote bias	EU (–100%) S ~ EU (100%) S	EU (0%) S		P.30
rrL (R/L)	Remote/ Local mode selection	LOCL (local) or REM (remote)	LOCL		P.30
SC (SC)	"SUPER" function ON/OFF	ON or OFF	OFF		P.31
At (AT)	Auto-tuning ON/OFF	ON or OFF	OFF		P.31
db (DB)	Dead Band (only for UT38)	1.0 ~ 10.0% (Percentage to computed control output value)	3.0%		P.32
rHY (RHY)	Relay hysteresis (only for UT38)	0.1 ~ 0.5% (Percentage to computed control output value)	0.5%		P.32
SP (SP)	Setpoint (main)	EU (0%) ~ EU (100%)	EU (0%)		P.32
2.SP (2. SP)	Secondary setpoint	EU (0%) ~ EU (100%)	EU (0%)		P.33

This is the page No. of Initial Setting Manual (IM5B4B7-01E).

Display	Setting Item	Setting Range	Initial set value	Customer's set value	Reference page
P (P)	Proportional band	0.1 ~ 999.9%	5.0%		P.33
I (I)	Integral time	OFF or 1 ~ 6000 sec	240 sec		P.34
d (D)	Derivative time	OFF or 1 ~ 6000 sec	60 sec		P.35
Mr (MR)	Manual reset value	–5.0 ~ 105.0%	50.0%		P.35
HY (HY)	ON/OFF control hysteresis	EU (0.0%)S ~ EU (100.0% S	EU (0.5%)S		P.35
oH (OH)	Output high limit value	–5.0≤OL<OH ≤105.0%	100.0%		P.35
oL (OL)	Output low limit value	(Percentage to computed control output value)	0.0%		P.35
2.P (2. P)	Proportional band for secondary SP	0.1 ~ 999.9%	5.0%		P.35
2.I (2. I)	Integral time for secondary SP	OFF or 1 ~ 6000 sec	240 sec		P.35
2.d (2. D)	Derivative time for secondary SP	OFF or 1 ~ 6000 sec	60 sec		P.35
2.Mr (2. MR)	Manual reset value for secondary SP	–5.0 ~ 105.0%	50.0%		P.35
2.HY (2. HY)	ON/OFF control hysteresis for secondary SP	EU (0.0%) S ~ EU (100.0%) S	EU (0.5%)S		P.35
2.oH (2. OH)	Output high limit value for secondary SP	–5.0≤OL<OH ≤105.0%	100.0%		P.35
2.oL (2. OL)	Output low limit value for secondary SP	(Percentage to computed control output value)	0.0%		P.35

This is the page No. of Initial Setting Manual (IM5B4B7-01E).

ประวัติผู้เขียน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำโดย นางสาวนิศาพร เกียรติไพศาลโสภณ เกิดวันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2511. ที่อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาขั้นปริญญาตรีจากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒสงขลา สาขาการศึกษาวิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์ เกียรตินิยมอันดับ 2 เมื่อปีการศึกษา 2532 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2533 ประสบการณ์การทำงานเป็นอาจารย์ในห้องปฏิบัติการ 1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยมหานคร เมื่อปี พ.ศ. 2533 เป็นอาจารย์พิเศษในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2533-2534 เป็นผู้ช่วยนักวิจัยโครงการวิจัยเรื่อง "ระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกี" ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัยแห่งชาติ โดยเริ่มจาก พ.ศ. 2535-2536 เคยได้รับทุนการศึกษาจากราชกรีฑาสโมสร ในปี พ.ศ. 2533 และ 2534 ได้เสนอบทความวิจัยเรื่อง "การพัฒนาระบบปลูกผลึกแบบโชคราลสกี" ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่19 พ.ศ. 2536

1 เมษายน 2537 เริ่มทำงานที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สวทช. ประจำห้องปฏิบัติการอิเล็กโตรออพติคส์ (electro-optics lab)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้