สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

BASIC ANALOG INTEGRATED CIRCUIT LABORATORY SET USING CMOS

ชาคริต โพธิ์บัว

CHAKRIT POBUA

วพ.
TA630
2555

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....128737
วัน, เดือน, ปี..12 พย. 2556

ห้ id
.b.....12551223
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2555

KMITL–2012–ED-M-232-061

BASIC ANALOG INTEGRATED CIRCUIT LABORATORY SET USING CMOS

CHAKRIT POBUA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN INDUSTRIAL EDUCATION
IN ELECTRONICS
FACULTY OF INDUSTRIAL EDUCATION
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012

KMITL–2012–ED-M-232-061

COPYRIGHT 2012
FACULTY OF INDUSTRIAL EDUCATION
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส
นักศึกษา	นายชาคริต โพธิ์บัว
รหัสประจำตัว	50064301
ปริญญา	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	อิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.กิติพงค์ มะโน
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.วิสุทธิ์ สุนทรกนกพงศ์

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนา หาคุณภาพ และประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย แผงชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส ใบงานจำนวน 4 ใบงาน แบบทดสอบระหว่างปฏิบัติใบงาน และแบบทดสอบรวมซึ่งครอบคลุมเนื้อหาในเรื่องวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส โดยเครื่องมือที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นทั้งหมดได้ผ่านการตรวจสอบคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิด้านเนื้อหาและด้านชุดทดลอง กลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 2 หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต(ครุศาสตร์วิศวกรรม) คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2554 จำนวน 12 คน ผลการวิจัยพบว่า ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส มีคุณภาพด้านเนื้อหาใบงานของชุดทดลองในระดับดีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.43 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.65 และคุณภาพด้านชุดทดลองในระดับดี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.50 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.68 และประสิทธิภาพของชุดทดลอง E1/E2 เท่ากับ 84.64 / 82.10 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ 80/80 ที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้

Thesis Title	Basic Analog Integated Circuit Laboratory Set using CMOS
Student	Mr.Chakrit Pobua
Student ID.	50064301
Degree	Master of Science in Industrial Education
Program	Electronics
Year	2012
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Kitipong Mano
Thesis Co-Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisuit Sunthonkanokpong

ABSTRACT

The purposes of this research were to develop and to find the quality and efficiency of the Basic Analog Integated Circuit Laboratory Set using CMOS. The tools utilized for this study consisted of the Basic Analog Integated Circuit Laboratory Set using CMOS, 4 labsheets, formative test and summative test which covered the Basic Analog CMOS Integrated Circuit theory. The research sample groups were 12 second-year students from Bachelor of Science in Industrial Education (Engineering Education), Faculty of Industrial Education, King Mongkut's Institute of technology Ladkraband. The research results were found that the quality of the Basic Analog Integated Circuit Laboratory Set using CMOS on the content of the labsheet was at the good level ($\overline{x}$=4.43, S.D. =0.65) while the laboratory set was at the very good level ($\overline{x}$=4.50, S.D. =0.68). The efficiency of laboratory set or E1/E2 was 84.64 / 82.10 which met the specified criteria or 80/80.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ก็ด้วยความอนุเคราะห์จาก รศ.กิติพงค์ มะโนอาจารย์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.วิสุทธิ์ สุนทรกนกพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆจนวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆในขั้นตอนสุดท้ายจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 5 ท่านที่ได้กรุณาช่วยเหลือให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆของเครื่องมือวิจัยในครั้งนี้ เพื่อปรับปรุงให้มีคุณภาพและเหมาะสมต่อการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผศ.พิชญ์สินี มะโน ที่คอยให้คำปรึกษา กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยในทุกด้าน

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ สันต์ และ คุณแม่ พรทิพย์ โพธิ์บัว ที่คอยเป็นกำลังใจ สนับสนุนและช่วยเหลือในทุกด้านมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ วดีนาถ วรรณสวัสดิ์กุล และเพื่อนๆที่คอยช่วยเหลือผู้จัยทุกอย่างเป็นกำลังใจ พร้อมให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านด้วยความเคารพยิ่ง หากมีข้อผิดพลาดประการใดผู้วิจัยของอภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ชาคริต โพธิ์บัว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VI

สารบัญรูป VII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย 2

1.4 กรอบความคิด 2

1.5 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.6 คำนิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการวิจัย 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 วิชาการปฏิบัติการทางวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ 2 5

2.2 วงจรอนาลอกโดยใช้ซีมอส 5

2.3 กรอบความคิด 24

2.4 การสอนภาคปฏิบัติ 24

2.5 การหาประสิทธิภาพของชุดทดลอง 25

2.6 การหาค่าความเที่ยงตรงของเครื่องมือวิจัย 26

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 28

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 31

3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง 31

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย 31

3.3 ขั้นตอนในการสร้างเครื่องมือ 32

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล 41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล 41

3.6 สถิติที่ใช้ในการวิจัย 41

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล 44

4.1 การวิเคราะห์คุณภาพชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอส เบื้องต้นด้านชุดทดลอง 44

4.2 การวิเคราะห์คุณภาพชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอส เบื้องต้นด้านเนื้อหาใบงาน 45

4.3 การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอส เบื้องต้น 47

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ 49

5.1 สรุปผลการวิจัย 49

5.2 อภิปรายผลการวิจัย 51

5.3 ข้อเสนอแนะ 51

บรรณานุกรม 53

ภาคผนวก 56

ประวัติผู้เขียน 117

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 พารามิเตอร์ของเอ็นฮานซ์เมนต์และดีพลีชั่นของทรานซิสเตอร์แบบ n MOS 11

4.1 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และระดับความคิดเห็น
ของผู้ทรงคุณวุฒิด้านชุดทดลอง 45

4.2 แสดงค่าเฉลี่ยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และระดับความคิดเห็น
ของผู้ทรงคุณวุฒิด้านใบงาน 46

4.3 ประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอสเบื้องต้นกับ
กลุ่มตัวอย่าง 12 คน 47

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ n MOS และ p MOS 7

2.2 ก. ชนิดเพิ่มพูนหรือเอนฮานซ์แมนต์ 7

ข. มอสเฟตชนิดลดหรือดีพลีชัน 8

2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหล เมื่อ V_{GS} เปลี่ยนแปลง 8

2.4 n MOSFET แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ สำหรับการสร้างโมเดล 8

2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ n-type MOSFET 13

2.6 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ CMOS 14

2.7 แสดงโครงสร้างพื้นฐานภายในของ Op-Amp 15

2.8 วงจรภายในของ CMOS Op-Amp (TLC 251) 16

2.9 วงจรสะท้อนกระแส (current minor) แบบพื้นฐาน 16

2.10 ผลของโหลดต่อการเปลี่ยนแปลงกระแส I_{ref} เมื่อคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ เปลี่ยนแปลง 17

2.11 วงจรสะท้อนกระแสที่ใช้ แอคทีฟโหลด 17

2.12 วงจรขยายความแตกต่างที่ใช้คู่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ 18

2.13 วงจรขยายความแตกต่างใช้ MOSFET 18

2.14 วงจรขยายความแตกต่างใช้ active load 19

2.15 วงจรขยายความแตกต่างใช้ pMOS เป็นคู่ขยาย 20

2.16 กราฟแสดงคุณสมบัติของโหลดในวงจรรูปที่ 2.14 20

2.17 วงจรทางเอาต์พุตของออปแอมป์ 22

2.18 แสดงคุณสมบัติทางโหลดของวงจรทางเอาท์พุท 25

2.19 ก. แสดงคุณสมบัติทางโหลดของวงจรทางเอาต์พุต 25

ข. แสดงในการเปลี่ยนจุดทำงานของวงจรทางเอาต์พุตที่ขึ้นอยู่กับ V_i 25

2.20 วงจรทางเอาต์พุตที่ใช้ CMOS 26

2.21 วงจรทางเอาต์พุตที่ใช้ NMOS 26

2.22 Op-Amp แบบง่ายๆ ที่สามารถสร้างได้จาก Monolithic CMOS 27

2.23 การวัดสลูเรทของ Op-Amp 28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

2.24 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติทางความถี่และเฟส 30
2.25 โครงสร้างภายใน CD4007 23
3.1 ขั้นตอนการสร้างชุดทดลองวงจรรวมเชิงอุปมาโดยใช้ซีมอสเบื้องต้น 34
3.2 ขั้นตอนการสร้างใบงานทดลอง 36
3.3 ขั้นตอนการสร้างแบบประเมินความคิดเห็นผู้ทรงคุณวุฒิด้านเนื้อหาและ
สื่อชุดทดลอง 38
3.4 ขั้นตอนการสร้างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน 40

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นับเป็นอุตสาหกรรมการผลิตชนิดหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อการขยายตัวของเศรษฐกิจประเทศ โดยมีมูลค่าการส่งออกสูงเป็นอันดับหนึ่ง ตั้งแต่ปี 2538 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งตัวเลขอย่างเป็นทางการจากกระทรวงแรงงานระบุว่า เกิดการขาดแคลน แรงงานพื้นฐานในภาคอุตสาหกรรมการผลิต-การส่งออก เพิ่มสูงขึ้น ภายหลังคำสั่งซื้อจากต่างประเทศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ต้องเพิ่มกำลังการผลิตอย่างต่อเนื่องแต่ ประสบปัญหาเรื่องจำนวนแรงงานที่มีคุณภาพ และในช่วงที่ผ่านมา ผู้ประกอบการรายใหญ่หลายรายเลือกที่จะแก้ปัญหาด้วยการจ่ายค่าแรงสูงกว่าแรงงานขั้นต่ำเพื่อดึงดูดแรงงานที่มีคุณภาพเข้ามาทำงานและลงทุนในด้านการพัฒนาบุคลากรใหม่ให้มีความรู้และความสามารถด้านกระบวนการผลิตและวงจรรวมพื้นฐานของเทคโนโลยีซีมอส

นอกจากการขาดแคลนแรงงานระดับล่าง หรือพนักงานฝ่ายผลิตแล้วอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมการผลิตเทคโนโลยีที่มีความซับซ้อน จึงจำเป็นต้องใช้บุคคลากรที่มีความรู้ ความสามารถ ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ในการวิเคราะห์ การออกแบบ วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากเช่นกัน โดยเฉพาะแรงงานที่มีพื้นฐานการวิเคราะห์และการออกแบบวงจรรวมที่ส่วนใหญ่ใช้เทคโนโลยีซีมอส ซึ่งในปัจจุบันมีบทบาทมากขึ้นเป็นลำดับ เนื่องจากเทคโนโลยีการผลิตของซีมอสมีขบวนการผลิตที่สั้นกว่าขบวนการผลิตทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ จึงทำให้นักออกแบบวงจรรวมขนาดใหญ่นำอุปกรณ์ประเภทซีมอสมาใช้เป็นอุปกรณ์หลักในการออกแบบระบบและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ทั้งด้านแอนาลอกและดิจิตอล เช่นการขยายสัญญาณ การประมวลผลสัญญาณแอนาลอก การปรับรูปร่างสัญญาณ การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล เป็นต้น

อย่างไรก็ตามในสถานศึกษาที่เปิดการเรียนการสอนเกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนใหญ่วิชาเรียนที่มีเนื้อหาเกี่ยวกับวงจรรวมเบื้องต้นในวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่จะเน้นทฤษฎี การคำนวณการออกแบบวงจรรวม และจำลองผลการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น โปรแกรม Pspice, MATLAB, OrCAD ซึ่งทำให้ผู้เรียนขาดทักษะ การใช้อุปกรณ์จริง ขาดความมั่นใจในการใช้งาน ขาดทักษะการแก้ไขปัญหาการใช้งานจริง และการจินตนาการเพื่อประยุกต์ใช้งานในวงจรหรือระบบอื่นๆ

ดังนั้นเพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาทางด้านการวิเคราะห์และการออกแบบวงจรรวมเบื้องต้นเพื่อพัฒนาการเรียนการสอนด้านวงจรรวมให้ผู้เรียนมีทักษะพื้นฐานเพิ่มมากขึ้น ผู้วิจัยจึงนำเสนอการออกแบบและสร้างชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสที่มีประสิทธิภาพและมีความ

สอดคล้องตามเนื้อหาหลักสูตรในสถานศึกษา ซึ่งชุดทดลองนี้จะเน้นให้ผู้เรียนได้เรียนรู้เกี่ยวกับโครงสร้างวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส และในการทดลองจะใช้แนวทางของวงจรออปแอมป์จากอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยีซีมอสเพื่อช่วยให้การจัดกิจกรรมการเรียนการสอนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะส่งผลทำให้ผู้เรียนมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนที่ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสที่มีคุณภาพ

1.2.2 เพื่อหาประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสที่สร้างขึ้นมีคุณภาพอยู่ในระดับดีขึ้นไป $(\overline{X} \geq 3.5)$

1.3.2 ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ 80/80 (E_1 / E_2)

1.4 กรอบความคิด

การสร้างชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสนี้ ผู้วิจัยได้ใช้กรอบแนวความคิดของ วัลลภ จันทร์ตระกูล. (2552 : 27) มาใช้ในการวิจัยเพื่อสร้างและหาประสิทธิภาพของชุดทดลองโดยมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.4.1 กำหนดจุดมุ่งหมายในการนำชุดทดลองไปใช้ในการสอน

1.4.2 วิเคราะห์และตัดสินใจในการเลือกวัสดุชิ้นส่วนประกอบของอุปกรณ์

1.4.3 เขียนและออกแบบวงจร

1.4.4 สร้างต้นแบบและตรวจสอบการตัดสินใจเลือกอุปกรณ์

1.4.5 พัฒนาใบงานทดลองเป็นใบสั่งงานให้กับนักศึกษา

1.4.6 ทดลองนำไปใช้ในสถานศึกษา

1.4.7 ปรับปรุงข้อมูล

1.4.8 หาประสิทธิภาพ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1.5.1.1 ประชากร

ประชากรที่ใช้ในการวิจัย เป็นนักศึกษาหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ครุศาสตร์วิศวกรรม) แขนงอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม ที่ลงทะเบียนเรียนวิชาการปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ในการศึกษา 2554 จำนวน 20 คน

1.5.1.2 กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างในการวิจัยเป็นวิจัย เป็นนักศึกษาหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ครุศาสตร์วิศวกรรม) แขนงอิเล็กทรอนิกส์สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังจำนวน 12 คน คัดเลือกโดยวิธีการสุ่มแบบเจาะจง

1.5.2 ขอบเขตเนื้อหา

หัวข้อวงจรรวมเบื้องโดยใช้ซีมอสนั้น เป็นเนื้อหาส่วนหนึ่งในวิชาการปฏิบัติการวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ 2 ซึ่งประกอบด้วยใบงานทดลองทั้งหมด 4 ใบงาน เพื่อให้ผู้เรียนได้ทำการทดลองดังนี้

ใบงานทดลองที่ 1 คุณสมบัติของซีมอส

ใบงานทดลองที่ 2 แหล่งจ่ายกระแสและวงจรสะท้อนกระแส

ใบงานทดลองที่ 3 ตัวขยายความแตกต่าง

ใบงานทดลองที่ 4 วงจรออปแอมป์สองภาค

1.6 คำนิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการวิจัย

1.6.1 ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส หมายถึง การนำเนื้อหาวงจรรวมเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสมาสร้างเป็นชุดทดลองที่ประกอบด้วยบอร์ดวงจรต่างๆ ที่ข้องเกี่ยวกับวงจรรวมเบื้องต้น จำนวน 4 บอร์ด ใบงานทดลองจำนวน 4 ใบงาน และคู่มือการใช้งาน

1.6.2 ใบงานทดลอง หมายถึง ใบกำหนดขั้นตอนการปฏิบัติงานและสั่งงานเพื่อให้ผู้เรียนสามารถลงมือปฏิบัติตามได้อย่างเป็นลำดับ โดยมีองค์ประกอบดังนี้

1.6.2.1 หัวข้อใบงานทดลอง

1.6.2.2 วัตถุประสงค์ใบงานทดลอง

1.6.2.3 เนื้อหาทฤษฎี

1.6.2.4 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.6.2.5 ลำดับขั้นการทดลอง

1.6.2.6 แบบฝึกหัดท้ายใบงานทดลอง

1.6.3 คุณภาพ หมายถึง ผลที่ได้จากการประเมินชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสของผู้ทรงคุณวุฒิ โดยแบ่งเป็น 2 ด้านคือ ด้านชุดทดลอง และด้านใบงานทดลอง

1.6.4 แบบทดสอบท้ายใบงาน หมายถึง แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังจากผู้เรียนลงมือปฏิบัติแต่ละใบงานของทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นโดยเป็นแบบทดสอบปรนัย 5 ตัวเลือก

1.6.5 แบบทดสอบรวม หมายถึง แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังจากผู้เรียนลงมือปฏิบัติแต่ละใบงานของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นครบทั้ง 4 ใบงานแล้ว โดยเป็นแบบทดสอบปรนัย 5 ตัวเลือก

1.6.6 แบบสังเกตพฤติกรรม หมายถึง แบบบันทึกคะแนนจากพฤติกรรมของผู้เรียนในระหว่างลงมือปฏิบัติการทดลองในแต่ละใบงานเพื่อบันทึกผลการปฏิบัติงานและการตอบคำถามในใบงานของผู้เรียนตามน้ำหนักที่กำหนด

1.6.7 ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน หมายถึง คะแนนที่ได้จากการสังเกตพฤติกรรมรวมกับคะแนนที่ผู้เรียนได้จากการทำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังจากที่ผู้เรียนได้ลงมือปฏิบัติการทดลองตามใบงานของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

1.6.8 ประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส หมายถึง ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของผู้เรียนที่ได้จากการปฏิบัติ ซึ่งไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด 80/80 (E1/E2)

80 ตัวแรก (E1) หมายถึง ร้อยละของคะแนนเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง ที่ได้จากคะแนนในแบบสังเกตพฤติกรรมรวมกับคะแนนที่ผู้เรียนได้จากการทำแบบทดสอบท้ายใบงาน

80 ตัวหลัง (E2) หมายถึง ร้อยละของคะแนนเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง ที่ได้จากคะแนนในแบบสังเกตพฤติกรรมรวมกับคะแนนที่ผู้เรียนได้จากการทำแบบทดสอบรวม หลังจากได้ปฏิบัติครบทั้ง 4 ใบงาน

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยเพื่อสร้างและทดลองหาประสิทธิภาพของชุดชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส ผู้วิจัยได้ลำดับหัวข้อการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษาข้อมูลต่างๆ ดังนี้

2.1 วิชาการปฏิบัติการทางวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ 2
2.2 วงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอส
2.3 กรอบแนวความคิด
2.4 การสอนภาคปฏิบัติ
2.5 การหาประสิทธิภาพของชุดทดลอง
2.6 การหาค่าความเที่ยงตรงของเครื่องมือวิจัย
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิชาการปฏิบัติการทางวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ 2

หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิตสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้เปิดการเรียนการสอนในกลุ่มวิชาชีพวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีเนื้อหาวิชาเกี่ยวกับวงจรรวมเบื้องต้น โดยในกลุ่มวิชาบังคับคือวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิชาปฏิบัติการทางวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ 2 ส่วนกลุ่มวิชาเลือกคือวิชาการวิเคราะห์และออกแบบวงจรรวม วงจรรวมขนาดใหญ่มากเบื้องต้น และวิชาระบบและวงจรซีมอส ซึ่งรายวิชาดังกล่าวข้างต้นมีเนื้อหาเกี่ยวกับวงจรรวมและกระบวนการผลิตโดยใช้เทคโนโลยีซีมอส

2.2 วงจรแอนาลอกโดยใช้ซีมอส

อุปกรณ์พื้นฐานของสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์คือตัวขยายและตัวขยายพื้นฐานที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้งานง่ายคือ ออปแอมป์(Op-Amp) ซึ่งมีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในระบบอิเล็กทรอนิกส์ทั่วๆไป เช่น สามารถสร้างวงจรขยายแรงดัน วงจรขยายกระแส วงจรรวมสัญญาณ วงจรกรองสัญญาณ วงจรกำเนิดสัญญาณ เป็นต้น

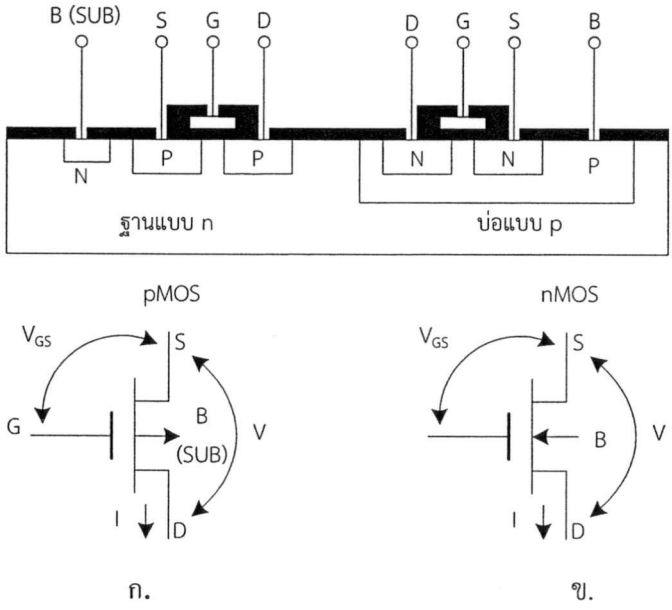
ปัจุขันมักออกแบบและการสร้างออปแอมป์โดยใช้ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ และทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า ปัญหาสำคัญของเทคโนโลยีไบโพลาร์สำหรับการสร้างวงจรรวมก็คือ มีโครงสร้างขนาดใหญ่ ใช้เวลามากในกระบวนการผลิต และกินกำลังงานมาก ทำให้มีข้อจำกัดในการผลิตวงจรระดับใหญ่หรือระดับใหญ่มากๆ (Very Large Scale Integrated Circuit: VLSI) ดังนั้นทำให้นักออกแบบ

วงจรรวมเริ่มหันมาออกแบบวงจรรวมแอนาลอกที่ใช้เทคโนโลยีของมอส (MOS Technology) มากขึ้น ซึ่งจะทำให้การผลิตวงจรระดับใหญ่หรือระดับใหญ่มากง่ายขึ้น โดยจะเห็นว่าในปัจจุบันมีการผลิตออปแอมป์ เดี่ยวๆ ที่ใช้เทคโนโลยีของมอส มีจำนวนน้อยลง อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าออปแอมป์ที่ใช้ซีมอสมักจะเป็นส่วนหนึ่งของวงจรรวมขนาดใหญ่เช่น วงจรเปรียบเทียบ วงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลหรือวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก เป็นต้น

2.2.1 มอสเฟต (MOSFET)

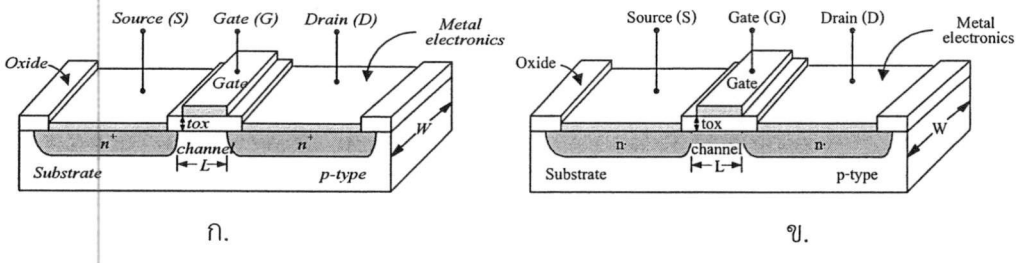
2.2.1.1 โครงสร้างและชนิดของมอสเฟต

มอสเฟต (MOSFET) เป็นชื่อย่อมาจาก Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor เป็นทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่งที่ทำงานโดยอาศัยผลของสนามไฟฟ้า โดยมีข้อได้เปรียบกว่าทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ คือ มอสเฟตจะมีความต้านทานอินพุตสูงกว่าไบโพลาร์ มีสัญญาณรบกวนต่ำ มีรูปลักษณ์ของวงจรง่ายกว่า และข้อได้เปรียบทางโครงสร้าง ทำให้มอสเฟตใช้พื้นที่ในการสร้างน้อย และมีขบวนการสร้างที่ซับซ้อนน้อยกว่าไบโพลาร์ ดังนั้น เมื่อนำมาสร้างเป็นวงจรรวมแล้ว จะได้ขนาดของ ชิป (chip) ที่มีขนาดเล็กและประหยัดพลังงาน โดยมอสเฟตมีโครงสร้างหลักประกอบด้วยโลหะ ออกไซด์ และสารกึ่งตัวนำ และเป็นอุปกรณ์ใช้งานพื้นฐาน ชนิดหนึ่งมี 4 ขา ได้แก่ เกท (G:Gate) เดรน (D:Drain) ซอส (S:Sorce) และ บอดี(B:Body) หรือฐานรอง(Substrate) ที่ทำงานโดยการควบคุมการไหลของกระแสทางเอาต์พุตด้วยสนามหรือแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตและสามารถแบ่งมอสเฟตตามโครงสร้างได้ 2 แบบ คือมอสเชนแนลเอ็น (n channel MOS)หรือเรียกสั้นๆว่า เอ็นมอส (nMOS) และมอสเชนแนลพี(p channel MOS) เรียกสั้นๆว่า พีมอส (pMOS) ดังโครงสร้างในภาพที่ 1 ก และ ข ตามลำดับ การทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ nMOS อาศัยหลักการเหนี่ยวนำประจุลบให้เกิดขึ้นเพื่อเป็นช่องผ่านของพาหะเรียกว่าเชนแนล (Channel) ในทางกลับกันทรานซิสเตอร์แบบ pMOS จะใช้การเหนี่ยวนำประจุบวก ดังนั้นเมื่อให้แรงดันที่เกทเปลี่ยนแปลง จะทำให้ความนำระหว่างเดรนกับซอสเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลให้กระแสเดรนเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นมอสเฟตจึงเป็นอุปกรณ์ควบคุมกระแสด้วยแรงดัน โดยที่แรงดัน V_{GS} หมายถึง ศักดาไฟฟ้าที่เกทอ้างอิงกับซอส ส่วน V_{ds} หมายถึงศักดาไฟฟ้าที่เดรนอ้างอิงกับซอส และ I_{ds} หมายถึง กระแสที่ไหลระหว่างเดรนกับซอสสำหรับขาบอดี(Body) หรือฐานรอง (Substrate) เป็นขาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน(Threshold voltage)หรือแรงดันที่เกทเทียบกับซอสต่ำสุดที่ทำให้มีกระแสไหลระหว่างเดรนกับซอส V_{th} โดยเป็นการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวเท่านั้น แต่ในการใช้งานโดยทั่วไปเรามักจะลัดวงจรขาซอสกับฐานรอง



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ pMOS และ nMOS

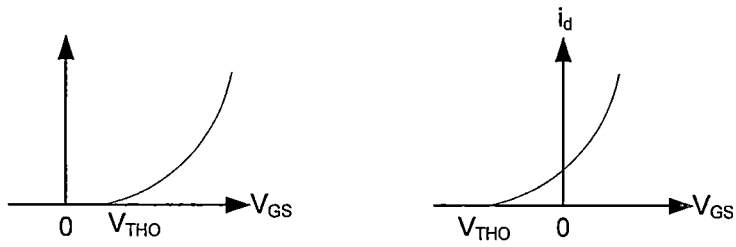
สามารถมอสเฟตตามลักษณะโครงสร้างได้สองชนิดคือชนิดเพิ่มพูนหรือเอนฮานซ์แมนต์ (Enhancement) และมอสเฟตชนิดลดหรือดีพลีชัน (Depletion) ทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน (กรณีเป็น nMOS) คือชนิดเพิ่มพูนภายใต้บริเวณเกทไม่มีชั้นสารชนิดเอ็น(n-type) เชื่อมต่อระหว่างเดรนกับซอส ส่วนชนิดชนิดลดหรือดีพลีชันภายใต้บริเวณเกทจะมีชั้นสารชนิด เอ็น (n-type) เชื่อมต่อระหว่างเดรนกับซอส ชั้นสารชนิด n นี้ถูกสร้างเดรนกับซอสของทรานซิสเตอร์ได้สองชนิด โดยโครงสร้างมอสเฟตทั้งสองชนิดดังแสดงในภาพที่ 2.2 ก. และ ข. ตามลำดับ



ภาพที่ 2.2 ก. ชนิดเพิ่มพูนหรือเอนฮานซ์แมนต์ ข. มอสเฟตชนิดลดหรือดีพลีชัน

มอสเฟตทั้งสองชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสเดรนเมื่อ V_{GS} เปลี่ยนแปลงในมอสเฟตชนิดมอสเฟตชนิดลดหรือดีพลีชันและชนิดเพิ่มพูนหรือเอนฮานซ์แมนต์ โดย V_{THO} คือแรงดันระหว่าง เกท

เทียบกับซอสต่ำสุดเมื่อให้กระแสไหลระหว่างเดรนกับซอสมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าดังภาพที่ 2.3 ก และ ข ตามลำดับ

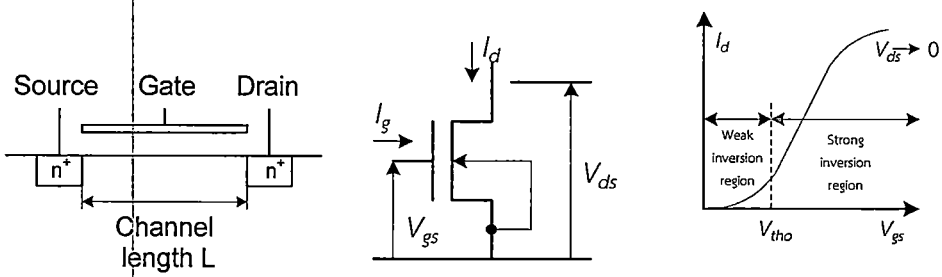


ก. ข.

ภาพที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหล เมื่อ V_{GS} เปลี่ยนแปลง

2.2.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์แบบ MOS

การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ มอสเฟต เป็นอุปกรณ์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เช่น PSpice จะต้องกำหนดโมเดลของ มอสเฟต ป้อนให้กับโปรแกรม ตัวอย่างการกำหนดโมเดลในที่นี้จะพิจารณา nMOS แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ตามคุณสมบัติแสดงในภาพที่ 2.4



ก. ข. ค.

ภาพที่ 2.4 n มอสเฟต แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ สำหรับการสร้างโมเดล

สมมุติว่าซอสกับบอดีต่อเข้าด้วยกัน จะมีเพียงแต่แรงดันหรือสนามไฟฟ้าที่เกทค่อยๆ เหนี่ยวนำประจุบนบอดีเพื่อสร้างช่องนำพาหะไฟฟ้า จนกระทั่งเมื่อแรงดันสูงเพียงพอที่ทำให้มีการระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่านจากเดรนไปยังซอส สังเกตเห็นว่าที่แรงดันเกทต่ำๆ ($V_{GS} < V_{THO}$) จะมีกระแสจำนวนน้อยๆไหลผ่าน (Weak inversion region) ลักษณะนี้จะคล้ายกับทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ npn โดยซอสเสมือนอิมิเตอร์ เดรนเสมือนคอลเลคเตอร์และบอดีที่ถูกเหนี่ยวนำเป็น ช่องยาว L เป็นเบส อย่างไรก็ดีเมื่อนำมาใช้งานราจะพิจารณาคุณสมบัติในช่วงต่อจากแรงดัน เทรชโฮล (Strong inversion region) ซึ่งจะมีกระแสเดรนจำนวนมากไหลโดยมีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

ก. สมการกระแสของ มอสเฟต

ถ้ากำหนด I_{ds} เป็นกระแสที่ไหลจากเดรนไปยังซอสผ่านแชนแนลยาว L ดังนั้น

$$I_{ds} = \frac{Q}{t} \tag{2.1}$$

เมื่อ Q = ประจุที่เหนี่ยวนำในแชนแนล

t = เวลาที่ประจุใช้วิ่งผ่านแชนแนล

โดยที่

$$\tau = \frac{L}{\mu E} \tag{2.2}$$

เมื่อ L = ระยะทาง

μE = ความเร็วอิเล็กตรอน

μ คือค่า mobility ของพาหะนำประจุ (Charge Carrier) ภายใต้สนามไฟฟ้า E มีหน่วยเป็น m^2N.Sec ถ้า V_{ds} มีค่าต่ำ ๆ จะประมาณได้ค่า

$$E = \frac{V_{ds}}{L} \tag{2.3}$$

ดังนั้น

$$\tau = \frac{L^2}{\mu V_{ds}} \tag{2.4}$$

ถ้า Q = จำนวนประจุลบที่วิ่งผ่านแชนแนล

= - ค่าคาพาซิแต็นซ์ของเกท x แรงดันคล่อมแผ่นตัวนำคู่ขนาน

$$= -C_g (V_{GS} - V_{THO} - \frac{V_{ds}}{2}) \tag{2.5}$$

เทอม $V_{ds}/2$ มาจากการพิจารณาว่าสนามไฟฟ้าตลอดความยาวของแชนแนลจะเกิดขึ้นเมื่อ แรงดันเฉลี่ยของแชนแนลเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันเดรน ซอส คือ $V_{ds}/2$

เนื่องจาก A คือค่าคาปาซิแตนซ์ของแผ่นตัวนำคู่ขนานที่มีพื้นที่ A และมีสารฉนวนความหนา D คั้นกลางอยู่โดยคือ ค่าคงที่ไดอิเลคตริก (Dieletric constant) ของสารฉนวน

ดังนั้น

$$Q = -\frac{\varepsilon A}{D}(V_{GS} - V_{THO} - \frac{V_{ds}}{2})$$

เนื่องจาก A = กว้าง x ยาว = WL

ดังนั้น

$$Q = -\frac{\varepsilon WL}{D}(V_{GS} - V_{THO} - \frac{V_{ds}}{2}) \quad (2.6)$$

จากสมการ (1), (3) และ (6) จะได้ว่า

$$I_{ds} = -I_{ds} = \frac{Q}{\tau} = -\frac{\mu\varepsilon W}{LD}[(V_{GS} - V_{THO})V_{ds} - \frac{1}{2}V_{ds}^{2}] \quad (2.7)$$

ข. สมการกระแสเมื่อ มอสเฟต อยู่ในช่วงไม่อิ่มตัว (Non Saturation region)

ถ้า V_{ds} มีค่าต่ำๆ จะตัดเทอม $V_{ds}/2$ ทิ้ง โดยพิจารณาว่า $V_{ds} < (V_{GS} - V_{THO})$

$$I_{ds} = \frac{\mu\varepsilon W}{LD}(V_{GS} - V_{THO})V_{ds} \quad (2.8)$$

หรือ

$$V_{ds} = \frac{LD}{\mu\varepsilon W(V_{GS} - V_{THO})} I_{ds}$$

เนื่องจากค่า μ, ε, W, L และ D มีค่าคงที่ ดังนั้นที่แรงดันไบอัส $(V_{GS} - V_{THO})$ ค่าหนึ่ง จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นของแรงดันและกระแส V_{ds} = ค่าคงที่ x I_{ds}

จากสมการนี้จึงสรุปได้ว่าถ้า V_{ds} มีค่าน้อย ๆ และ $(V_{GS} - V_{THO}) > 0$ มอสเฟต จะทำงานในช่วงลิเนียร์หรือในช่วงไม่อิ่มตัวและแรงดันขาออก (หรือกระแส) จะแปรผันโดยตรงกับแรงดันขาเข้า

ค. สมการกระแสเมื่อ มอสเฟต อยู่ในช่วงอิ่มตัว (Saturation region)

ในกรณีเพิ่มแรงดัน V_{ds} จน $V_{ds} = V_{GS} - V_{THO}$

จากสมการที่ 2-7 จะได้

$$I_{ds} = \frac{\mu\varepsilon W}{LD}[(V_{GS} - V_{THO})(V_{GS} - V_{THO}) - \frac{1}{2}(V_{GS} - V_{THO})^{2}]$$

$$I_{ds} = \frac{1}{2}\frac{\mu\varepsilon W}{LD}(V_{GS} - V_{THO})^{2} \quad (2.9)$$

สมการที่ 2-9 เป็นสมการที่ใช้การประมาณในกรณีที่ $V_{ds} > V_{GS} - V_{THO}$ จะต้องรวมเอาคุณสมบัติที่เรียกว่า Channel length modulation effect เนื่องจากแรงดันเดรนซอสทำให้เกิดการ

เปลี่ยนแปลงของชั้นดีพลีชั่นรอบ ๆ รอยต่อระหว่างเดรนและแชนแนล ซึ่งทำให้ความยาวของแชนแนลไม่คงที่ โดยเมื่อ V_{ds} เพิ่มขึ้น ความยาวของแชนแนลจะลดลง ผลที่ตามมาก็คือในบริเวณอิ่มตัว I_{ds} จะไม่คงที่ แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม V_{ds} ใช้พารามิเตอร์ที่เกิดผลนี้ว่า λ (แลมด้า) หรือ Channel-Shortening coefficient เพิ่มลงในสมการที่ 2-9 โดยคูณด้วย (1 + λ Vds) λ จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.005 – 0.07 จากสมการที่ 2-9 จะได้

$$I_{ds} = \frac{1}{2}\frac{\mu\varepsilon W}{LD}(V_{GS} - V_{THO})^2(1+\lambda V_{ds}) \qquad (2.10)$$

ในการใช้งานทางด้านอนาลอก มอสเฟต จะถูกไบอัสให้ทำงานในบริเวณอิ่มตัวทั้งนี้เพื่อให้ทราน- สคอนดักแตนซ์ (g_m) สูงและ Output Conductance ต่ำ

จากสมการทางไฟฟ้าของ มอสเฟต ในแต่ละกรณีต่างๆ ที่กล่าวมาสามารถสรุปคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ตามโมเดลได้ ดังนี้

1) ขนาดของกระแสเดรนสามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายโดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของความยาวต่อความกว้างของแชนแนลหรือตามขนาดของทรานซิสเตอร์

2) กรณีที่ทรานซิสเตอร์ทำงานในบริเวณไม่อิ่มตัว หากความต่างศักย์ระหว่างเดรนและซอสต่ำใกล้ศูนย์ ทรานซิสเตอร์จะแสดงตัวคล้ายเป็นตัวต้านทานแบบลิเนียร์โดยค่าความต้านทานนี้จะขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนของความกว้างและความยาวของแชนแนลและแรงดันที่เกท

3) สำหรับโมเดลแบบง่ายนี้ จะเห็นว่าพารามิเตอร์สามตัวที่มีความสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ได้แก่ μ หรือ mobility ของพาหะนำประจุ $C_{ox} = \varepsilon / D$ หรือคาปาซิตี้ของเกทต่อพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วยและ V_{THO} แรงดันเทรชโฮลพารามิเตอร์สองตัวแรกจะกำหนดเป็นพารามิเตอร์ตามขบวนการ (process parameter) เรียกว่า อินทรินซิคทรานสคอนดัดแตนซ์ (Intrinsic transconductance) เขียนแทนด้วย β_0 ซึ่ง $\beta_0 = \mu C_{ox}$ หรือ $\beta_0 = \mu\frac{C_{ox}}{2}$

4) แม้ว่าสมการทางไฟฟ้าที่กล่าวถึงข้างต้นจะพิจารณาแต่ต้นว่าเป็นทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ แต่ก็สามารถใช้ได้กับทรานซิสเตอร์แบบดีพลีชั่นเพียงค่าพารามิเตอร์บางตัวจะต้องเปลี่ยน ในตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์สำคัญ ๆ ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิด

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของเอ็นฮานซ์เมนต์และดีพลีชั่นของทรานซิสเตอร์แบบ nMOS

พารามิเตอร์	nMOS Enhancement	nMOS Depletion
แรงดันเทรชโฮล	V_{THO} = 0.7	V_{THO} = -3.5
Intrinsic transconductance	($\mu A/volt^2$) $\beta_0 = 25$	$\beta_0 = 20$

5) เมื่อ มอสเฟต ทำงานในบริเวณอิ่มตัวทรานคอนดัคแตนซ์ g_mจะหาได้จาก

$$g_m = \frac{dI_{ds}}{dV_{GS}} : V_{DS} = \text{คงที่}$$

$$= \frac{\beta_0 W}{L}(1+\lambda V_{DS})(V_{GS} - V_{THO})$$

จากสมการ 2.10

$$g_m = \sqrt{2\frac{\beta_0 W I_{ds}(1+\lambda V_{DS})}{L}} \qquad (2.11)$$

กรณีที่ $\lambda V_{DS} << 1$ $g_m = \sqrt{2\frac{W}{L}\beta_0 I_{ds}}$

และ Channel conductance $g_d = \frac{dI_{ds}}{V_{ds}}$ $V_{gs} =$ ค่าคงที่

$$= \frac{1}{\gamma_0}$$

$$= \frac{\beta_0 W \lambda}{2L}(V_{GS} - V_{THO})^2$$

$$= \frac{\lambda I_{ds}}{(1+\lambda V_{ds})} \qquad (2.12)$$

$$= \lambda I_{ds} \quad \text{เมื่อ } \lambda V_{ds} << 1$$

จากโมเดลง่าย ๆ ดังกล่าวจะบอกได้ว่า

1) อัตราขยาย (Stage gain) สูงสุดที่เป็นไปได้เท่ากับ g_m / g_d

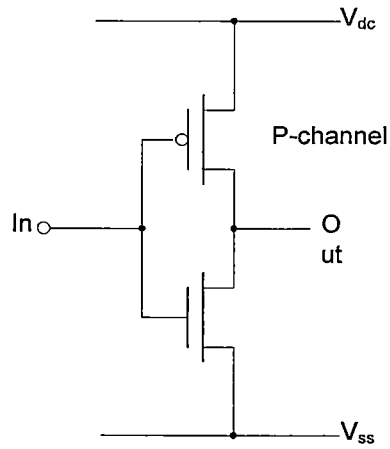
2) เนื่องจาก g_m / g_d เป็นสัดส่วนกับ $\frac{1}{\sqrt{I_d}}$ (สมการ 11, 12) การขยายจะลดลงเมื่อกระแสเดรนลดลง

2.2.2 มอสทรานซิสเตอร์คู่แบบคอมพลีเมนทารี (Complementary MOS transistor pair) หรือซีมอส (CMOS)

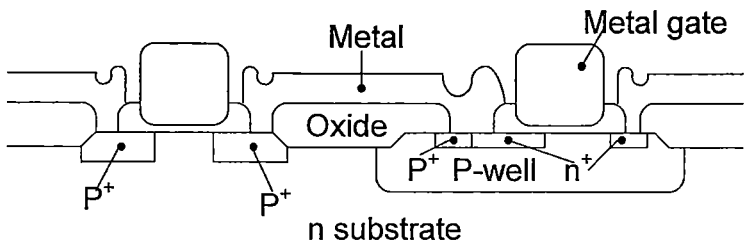
มอสทรานซิสเตอร์ได้พัฒนาขึ้นและใช้งานมากขึ้นเป็นลำดับตั้งแต่ปี 1970 ทั้งนี้เพราะขั้นตอนของกระบวนการผลิตมอสทรานซิสเตอร์มีน้อยกว่าขั้นตอนการผลิตไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ โดยเฉพาะ

อย่างยิ่งในการผลิตวงจรรวมสามารถลดพื้นที่ของซิลิกอนได้มากกว่า ทำให้วงจรรวมที่ผลิตมีต้นทุนต่ำ และต่อมาได้นำมอสทรานซิสเตอร์คู่แบบแชนแนลเอ็นมาใช้งานร่วมกับมอสทรานซิสเตอร์คู่แบบแชนแนลพี และเรียกมอสทรานซิสเตอร์คู่นี้ว่ามอสทรานซิสเตอร์คู่แบบคอมพลีเมนทารี และนิยมเรียกสั้นๆ ว่า ซีมอส (CMOS) โดยในระยะแรกนิยมนำมาใช้ในวงจรดิจิตอลเพราะกินกำลังต่ำจึงมีการนำซีมอสมาใช้ในวงจรรวมดิจิตอลอย่างแพร่หลายและต่อมามีการพัฒนาคุณสมบัติของซีมอสให้สามารถทำงานที่ความถี่สูงมากขึ้น จึงทำให้เป็นที่สนใจของนักออกแบบวงจรเชิงแอนาลอก ดังนั้นในปัจจุบันมีการนำซีมอสมาออกแบบวงจรรวมเชิงแอนาลอกอย่างกว้างขวางเพราะในระบบวงจรรวมในปัจจุบันมักพัฒนาวงจรรวมในลักษณะรวมระบบบนชิปเดียวกันซึ่งเป็นวงจรรวมที่ใช้สัญญาณร่วม(Mixed Signal) กันทั้งแอนาลอกและดิจิตอล

ปัจจุบันนิยมใช้ทรานซิสเตอร์ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นทำงานร่วมกันโดยการสร้างทรานซิสเตอร์ทั้งสองบนฐานเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ก. ในกรณีที่ใช้ฐานเป็นสารชนิด n และสร้าง pMOS บนฐานตามปกติ แต่ nMOS จะถูกสร้างบนบ่อแบบ P (P-well) ซึ่งฝัง อยู่ภายในฐานแบบ n อีกชั้นหนึ่ง บ่อแบบ p นี้ จะถูกสร้างขึ้นโดยการฉีดสารกึ่งตัวนำที่ให้ประจุบวกได้ลงไปในฐานแบบ n วิธีการจัดและสร้างวงจรแบบดังกล่าวเรียกว่ามอสทรานซิสเตอร์คู่แบบคอมพลีเมนทารี หรือเรียกสั้นๆ ว่าซีมอส ซึ่งทำให้วงจรใช้กำลังงานต่ำและทำงานได้ตามปกติ แม้ในขณะที่มีการรบกวนสูง ตัวอย่างวงจรอินเวอร์เตอร์แสดงในภาพที่ 2.5 ก. และโครงสร้างซีมอสของวงจรอินเวอร์เตอร์ในภาพที่ 2.5 ข.



ก.



ข. Metal gate p-well

ภาพที่ 2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ซีมอส

2.2.3 โครงสร้างของออปแอมป์

เพื่อให้คุณสมบัติของออปแอมป์เป็นไปตามดังกล่าวนี้

1) อัตราขยายความแตกต่างเมื่อไม่มีการป้อนกลับ > 10^5

2) ผลคุณสมบัติการขยายกับแบนด์วิดท์ (gain band width product) > 1 MHz

3) ความต้านทานขาเข้า (Input resistance) > 10^5 ohm.

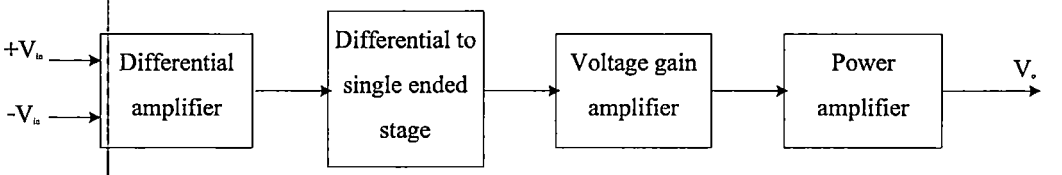
4) ความต้านทานขาออก (ไม่มีการป้อนกลับ) < 10^2ohm.

5) แรงดันออฟเซ็ท < 1mV.

6) Dynamic range > 80 % ของแรงดันไฟเลี้ยง

7) การกำจัดสัญญาณอินพุตเฟสเดียวกัน (CMRR) > 60 dB

การจัดวงจรภายในจึงประกอบด้วย 4 วงจรใหญ่ ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.6



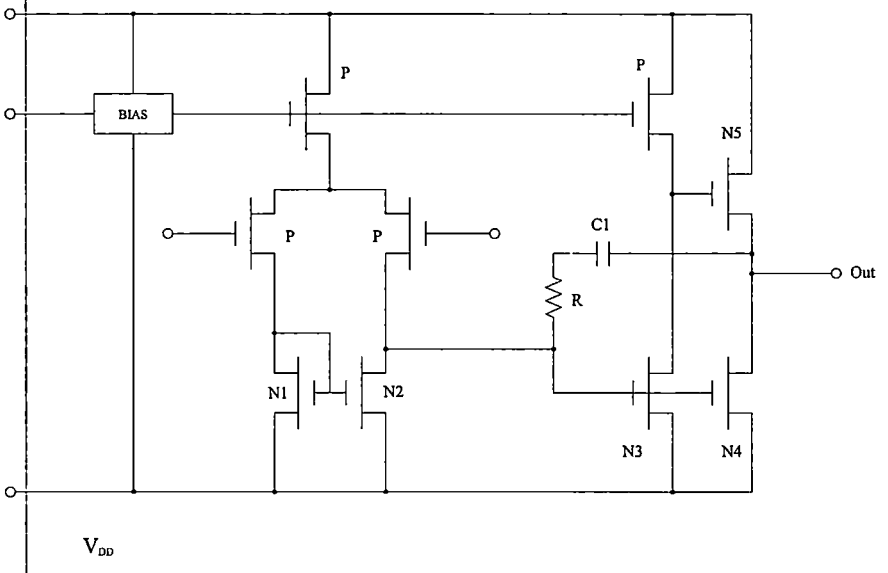
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานภายในของออปแอมป์

จากภาพที่ 2.6 ภาคแรกด้านอินพุตเป็นวงจรขยายความแตกต่าง และถัดมาเป็นวงจรปรับสัญญาณออกเป็นแบบปลายเดี่ยว(Single End) วงจรในภาคที่สาม เป็นวงจรขยายแรงดันเพื่อปรับให้อัตราขยายสูงขึ้น ในภาคสุดท้ายเป็นวงจรขยายกำลังที่ส่วนใหญ่ใช้วงจรคลาสเอบีเพื่อทำให้เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำลง และสามรถขับโหลดในช่วงกว้าง ๆ ได้

ในภาพที่ 2.7 แสดงวงจรภายในของซีมอสออปแอมป์แบบง่ายๆ ทรานซิสเตอร์แบบ pMOS P_1, P_2 , P_3ทำหน้าที่ในส่วนขยายความแตกต่าง ส่วนคู่ ทรานซิสเตอร์แบบ nMOS N_1 , N_2 ที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ และได้รับแรงดัน เกท-ซอส เท่ากันเป็นวงจรสะท้อนกระแส (Current Mirror) และทำหน้าที่เป็นโหลดให้คู่ขยายความแตกต่าง

จากคุณสมบัติของวงจรสะท้อนกระแส กระแสของสัญญาณที่ผ่านเข้า P_1 จะสะท้อนไปยัง N_2 รวมกันกระแสในส่วนที่ไหลผ่าน P_2 เอาต์พุตจากส่วนที่กล่าวข้างต้นจะป้อนเข้าสู่เกทของ N_3และ N_4 ซึ่งกระแสจาก N_3 จะผ่านไปขับโหลดที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวงจรจ่ายกระแสคงที่ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดันเพื่อป้อนสู่เกทของ N_5 ในส่วนของ N_5 เป็นวงจร Source follower เพื่อใช้ขับโหลดที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ N_4 ที่ต่ออยู่กับ N_5 จะช่วยเพิ่มอัตราขยายอีกเล็กน้อยแต่จะเพิ่มการขับกระแสผ่านโหลดได้ดีขึ้น

ตัวเก็บประจุ C_1 จะเพิ่มเสถียรภาพให้กับออปแอมป์โดยลดอัตราขยายที่ความถี่สูง เพื่อป้องกันการออสซิเลท แต่เนื่องจากออปแอมป์ที่สร้างด้วยมอสมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูงทำให้ยากที่จะควบคุมการเลื่อนเฟส เมื่อต้องขับโหลดแบบคาปาซิทีฟ วิธีการลดปัญหาวิธีหนึ่งก็คือ เพิ่มตัวต้านทานอนุกรมไปกับ C_1



ภาพที่ 2.7 วงจรภายในของซีมอสออปแอมป์

ปัญหาแรงดันอินพุตออฟเซ็ท ซึ่งสาเหตุสำคัญเกิดจากการไม่แมทช์กันของคู่ทรานซิสเตอร์อินพุต

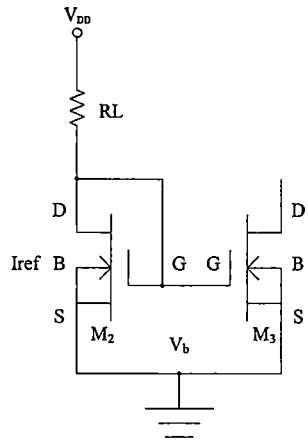
อย่างไรก็ตามข้อดีของซีมอสออปแอมป์คือกินกำลังงานต่ำสามารถทำงานได้แม้จ่ายแรงดันไฟเลี้ยงเพียง 1 โวลท์ หากนำไปใช้ในงานประยุกต์ที่ไม่ต้องการความเร็วสูงนัก

2.2.3.1 รายละเอียดโครงสร้างวงจรภายใน

รายละเอียดของโครงสร้างและการทำงานของซีมอสออปแอมป์มีดังนี้

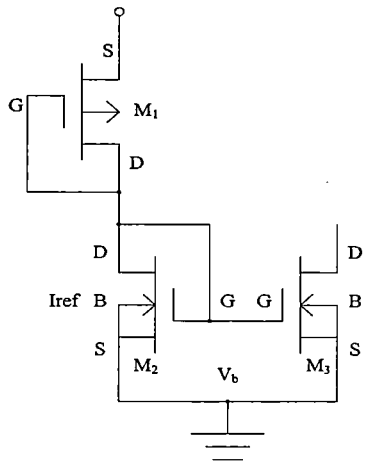
1) วงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐาน(basic current mirror)

วงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐานแสดงในภาพที่ 2.8 M_2 (nMOS) และตัวต้านทาน R_L จะเป็นตัวกำหนดกระแสอ้างอิง (I_{ref}) สังเกตว่าเกทและเดรนของ M_2 จะต่อเข้าด้วยกัน เมื่อแรงดันเกท-ซอส เกินกว่าแรงดันเทรสโฮลจะทำให้ M_2 ทำงานในช่วงอิ่มตัว โดย อัตราส่วนของการสะท้อนกระแสจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน W/L ของคู่ทรานซิสเตอร์ ในการผลิตนิยมใช้วิธีกำหนดความยาวของแชนแนลให้เท่ากันแต่จะเปลี่ยนความกว้างของแชนแนลเพื่อกำหนดอัตราส่วนของกระแส



ภาพที่ 2.8 วงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐาน

นอกจากนี้สามารถใช้แอคทีฟโหลดเป็น pMOS ได้เช่นเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 วงจรสะท้อนกระแสที่ใช้แอคทีฟโหลด

เมื่อคำนวณแรงดันไบอัส (V_b) ของ M_3 จากรูปวงจร เนื่องจากทั้ง M_1 และ M_2 อนุกรมกันอยู่ ทำให้มีกระแสเดรนเท่ากัน

$$I_1 = I_2 = I_{ref}$$

เมื่อ

$$I_1 = \frac{1}{2}\beta_{0M}\left(\frac{W}{L}\right)_{M1}(V_b - V_{DD} - V_{THO})^2$$

$$I_2 = \frac{1}{2}\beta N\left(\frac{W}{L}\right)_{M2}(V_b - V_{THON})^2$$

จากสมการทั้งสองสามารถหา V_b ได้ดังนี้

$$V_b = \frac{K_1 V_{DD} + K_1 V_{THOP} - K_2 V_{THON}}{K_1 - K_2}$$

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

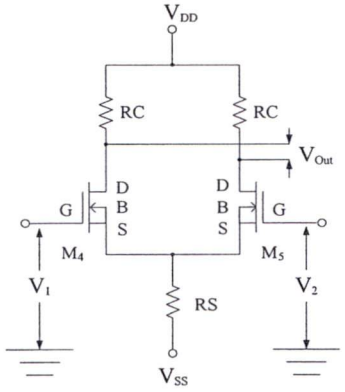
โดยที่

$$K_1 = \sqrt{\frac{1}{2}\beta_{0P}\left(\frac{W}{L}\right)_{M1}}$$

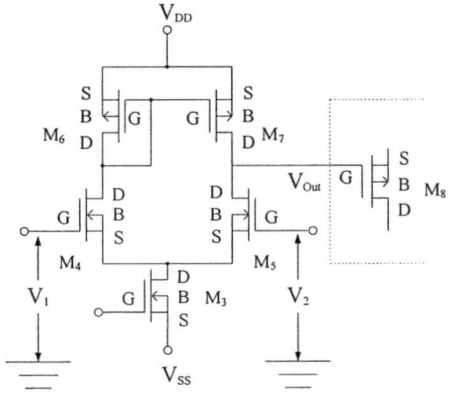
$$K_2 = \sqrt{\frac{1}{2}\beta_{0N}\left(\frac{W}{L}\right)_{M2}}$$

2) วงจรขยายความแตกต่าง

วงจรขยายความแตกต่างใช้ มอสเฟต เบื้องต้นดังแสดงในภาพที่ 2.10 ซึ่งใช้ความต้านทานเป็นตัวภาระงาน ส่วนวงจรขยายความแตกต่างใช้ nMOS เป็นคู่ขยายความแตกต่างจะใช้ pMOS เป็นแอคทีฟโหลดและใช้ nMOS เป็นแหล่งจ่ายกระแสที่ซอสของคู่ขยายความแตกต่าง ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ส่วนวงจรขยายความแตกต่างใช้ pMOS เป็นคู่ขยายความแตกต่างจะใช้ nMOS เป็นแอคทีฟโหลดและใช้ pMOS เป็นแหล่งจ่ายกระแสที่ซอสของคู่ขยายความแตกต่าง ดังแสดงในภาพที่ 2.12

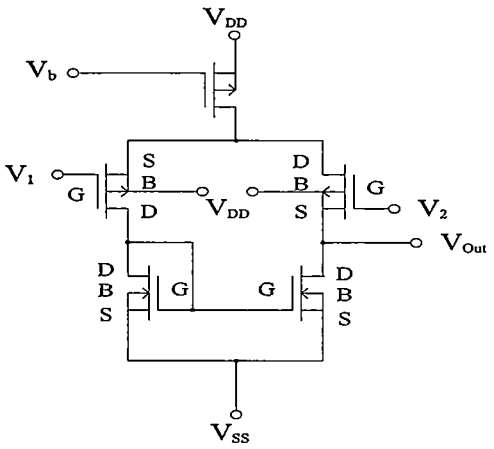


ภาพที่ 2.10 วงจรขยายความแตกต่างใช้มอสเฟต



ภาพที่ 2.11 วงจรขยายความแตกต่างใช้แอคทีฟโหลด

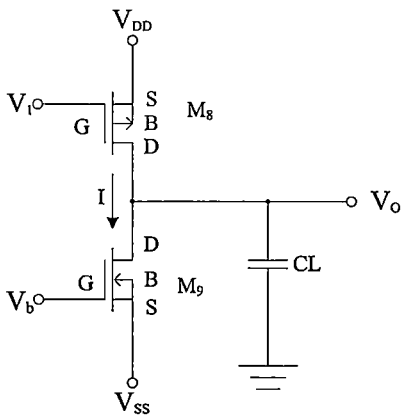
128737



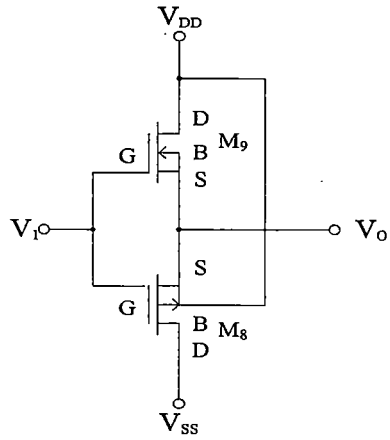
ภาพที่ 2.12 วงจรขยายความแตกต่างใช้ pMOS เป็นคู่ขยาย

3) วงจรทางเอาต์พุตของออปแอมป์

วงจรทางเอาต์พุตของออปแอมป์ มักใช้วงจรที่มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำเพื่อให้สามารถจ่ายกระแสโหลดได้สูง ๆ ในกรณีของ nMOS นิยมใช้วงจรคลาสเอบี(Class AB) ดังแสดงใน ภาพที่ 2.13 ส่วนวงจรทางเอาต์พุตที่ใช้ซีมอสแสดงได้ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.13 วงจรทางเอาต์พุตของออปแอมป์



ภาพที่ 2.14 วงจรทางเอาต์พุตที่ใช้ซีมอส

2.2.3.2 วงจรสมบูรณ์ของซีมอสออปแอมป์แบบพื้นฐาน

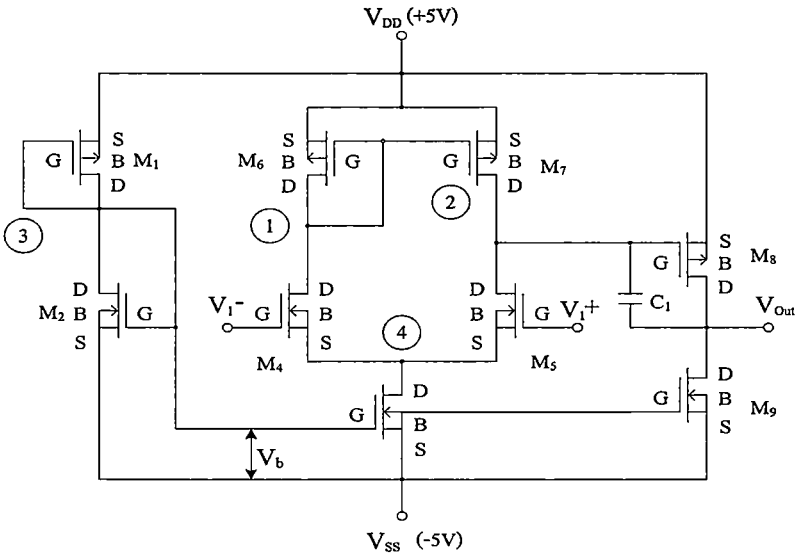
วงจรสมบูรณ์ของซีมอสออปแอมป์เบื้องต้นได้จากการนำมอสเฟตมาออกแบบ ดังนั้น พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ต้องทราบคืออัตราส่วน W/L ของมอสเฟต

2.2.4 คุณสมบัติของออปแอมป์

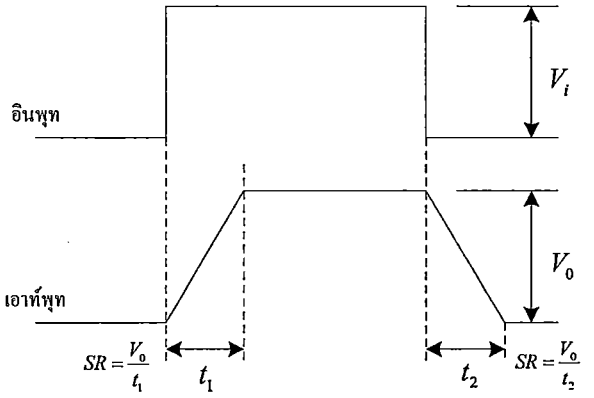
2.2.4.1 สลูเรท (Slew rate: SR)

เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสมพันธ์กับแถบความถี่ของออปแอมป์สามารถทดสอบง่าย โดยใช้พัลส์รูปสี่เหลี่ยมดังแสดงในภาพที่ 2.16 เมื่อมาพิจารณาออปแอมป์ในภาพที่ 2.15 จาก ความสัมพันธ์ของกระแส I_2 ของ M_2 และ I_3 ของ M_3

$$I_3 = \frac{I_2 (W/L) M_3}{(W/L) M_2}$$



ภาพที่ 2.15 ออปแอมป์ แบบง่ายๆ ที่สามารถสร้างได้จาก Monolithic CMOS



ภาพที่ 2.16 การวัดสลูเรทของ ออปแอมป์

กระแส I_3 ของ M_3 มีผลต่อค่าสลูเรทโดยกำหนดว่า

$$SR < I_3 \quad \omega / g_m = I_3 / C_1$$

โดย ω คือ ความถี่เชิงมุมของ Unity gain ของ ออปแอมป์

G_m คือ ทรานซ์คอนดัคแตนซ์ของคู่ขยายความแตกต่าง

เมื่อกำหนดให้ป้อนอินพุตด้วยสัญญาณรูปซายน์ขนาดที่ให้เอาต์พุตขนาดสูงสุดกับขนาด V_m และความถี่ f แรงดันเอาต์พุต V_0 เขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$V_0 = V_m \sin(t) = V_m \sin(2\pi ft)$$

ค่า SR คำนวณได้จากอนุพันธ์ของแรงดันเอาต์พุต

$$SR = \frac{dV_0}{dt} = V_m \omega \cos(\omega t)$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะขนาดจะได้ว่า

$$V_m = 2\pi f V_m < SR$$

2.2.4.2 อัตราขยายแรงดันไฟตรง (DC Voltage Gain)

กระแส I_9 ของ M_9 เป็นกระแสเอาต์พุตที่กำหนดอัตราขยายของ ออปแอมป์ ซึ่งจากความสัมพันธ์ของการสะท้อนกระแสระหว่าง I_9 และ I_4 ของ M_2 จะได้ว่า

$$I_9 = \frac{I_2 (W/L) M_9}{(W/L) M_2}$$

และจากสมการที่ 2-14 จะเห็นว่าหาก I_9 มีขนาดต่ำๆ จะทำให้อัตราขยายของออปแอมป์ สูงขึ้น และหากให้ Gv เป็นอัตราขยายรวมของ ออปแอมป์ ซึ่งเป็นผลคูณของอัตราขยายของส่วนอินพุต (A_v) และของส่วนเอาต์พุต () โดย

$$I_9 = \frac{I_2 (W/L) M_9}{(W/L) M_2}$$

$$A_v = -g_{m5} (r_{07} // r_{05})$$

$$A_v^{'} = -g_{m8} (r_{08} // r_{09})$$

$$G_v = 20\log(A_v) + 20\log(A_v^{'}) \quad (\text{dB})$$

อัตราขยายของ ออปแอมป์ จะขึ้นอยู่กับขนาดของอัตราส่วน W/L ของมอสเฟต ในส่วนขยายความแตกต่าง (M_4 และ M_7) และส่วนของเอาต์พุต M_8 และ M_9

2.2.4.3 คุณสมบัติทางความถี่

ในวงจรรวมออปแอมป์ตามโครงสร้างของมันจะประกอบด้วย องค์ประกอบที่เป็นลักษณะของตัวต้านทานและองค์ประกอบที่เก็บประจุ ในองค์ประกอบแรกจะสืบเนื่องคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในส่วนที่สองเป็นส่วนเกินที่เกิดจากกรรมวิธีในการสร้าง (layout) องค์ประกอบทั้งสองนี้ทำให้เกิดการเลื่อนของเฟสในกรณีที่นำออปแอมป์มาต่อเป็นวงจรขยาย ในบางครั้งหากมีการป้อนกลับทางลบที่ซับซ้อนอีกอาจทำให้ที่บางความถี่จะเกิดการเลื่อนเฟสถึง 360° ซึ่งกลายเป็นการป้อนกลับทางบวก และหากอัตราขยายที่ความถี่นี้เกินกว่าหนึ่ง (unity gain) ผลก็คือเกิดออสซิเลชั่นแทนที่จะขยายสัญญาณอินพุต ดังนั้นจุดสำคัญอันหนึ่งในการออกแบบวงจรขยายก็คือจะต้องแน่ใจว่า

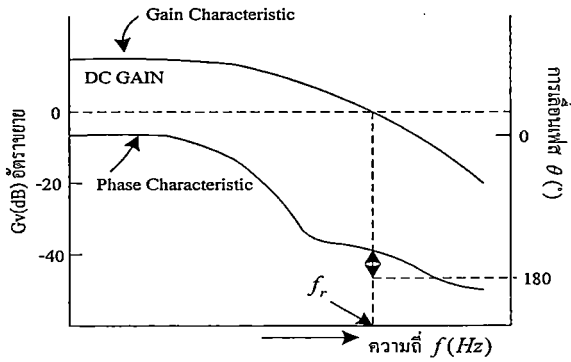
อัตราขยายของวงจรจะต้องน้อยกว่าหนึ่งที่ความถี่ที่มีการเลื่อนเฟสเป็นศูนย์ (the gain margin) หรือในทางกลับกัน การเลื่อนเฟสในลูปจะต้องอยู่ห่างๆ จากศูนย์ที่ความถี่ซึ่งอัตราขยายเป็นหนึ่ง (the phase margin) ค่าตัวอย่างของค่า margin คือ 10 dB ในกรณีของอัตราขยายและ 45° ในกรณีของเฟส

วิธีการที่ง่ายที่สุดสำหรับ ออปแอมป์ ที่ให้เข้าเงื่อนไขนี้ก็คือเติม dominant pole เพื่อคุมให้การเลื่อนเฟสในช่วงการทำงานปกติ (อัตราขยายมากกว่าหนึ่ง) ให้ไม่เกินไปกว่า 90° ในกรณีที่เป็นวงจรขยายขนาดใหญ่อาจทำง่ายๆโดยการใช้ตัวเก็บประจุ ขนาดใหญ่ต่อเอาต์พุตลงกราวด์ แต่ในกรณีของ ออปแอมป์ การรวมเอาตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ลงบนชิปจะเปลืองเนื้อที่มาก วิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในวงจรไบโพลาร์คือการใช้ Miller feedback effect คือใช้ตัวเก็บประจุค่าต่ำๆ ต่ออยู่ กับวงจรขยายในตำแหน่งที่ถูกต้องทำให้ค่าความจุที่ปรากฏมีขนาดใหญ่กว่าค่าจริง ในกรณีของ MOS ออปแอมป์ C_1 ภาพที่ 2.15 จะทำหน้าที่นี้

ในวงจรขยายช่วงความถี่ตอบสนอง (Band width) ที่ให้อัตราขยาย 0 dB เรียกว่า Unity gain bandwidth f_T ในกรณีของ ออปแอมป์ ในภาพที่ 2.15

$$f_T = g_{m5} / 2\pi C_1$$

ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากต้องการให้ ออปแอมป์ ทำงานได้ที่ความถี่สูง จะต้องให้ขนาด W/L ของ มอสเฟต (M_4 และ M_5) มีค่าสูงๆ กราฟในภาพที่ 2.17 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติทางความถี่และเฟส จะเห็นว่าที่ unity gain (-odB) จะมีการเลื่อนเฟสที่เอาต์พุตถึง 180° ซึ่ง ออปแอมป์ที่ใช้งานทั่วๆไปควรจะมีค่าไม่เกิน 30° เราอาจจะชดเชยค่าเฟสนี้ได้โดยเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุ แต่ก็จะมีผลต่อค่าสลูเรทของออปแอมป์



ภาพที่ 2.17 ตัวอย่างคุณสมบัติทางความถี่และเฟส

2.2.4.4 แรงดันอินพุตออฟเซ็ท

เป็นแรงดันไฟตรงทางอินพุตที่ขับให้แรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์เมื่อไม่มีอินพุตอื่นๆ ในกรณีของ ออปแอมป์ ในภาพที่ 2.15 หากไม่มีแรงดันออฟเซ็ทและแรงดันเอาต์พุต กระแสที่ไหลใน M_6 และ M_7 จะเป็นครึ่งหนึ่งของกระแสของ M_3 ซึ่งทำให้เป็นศูนย์ตามเงื่อนไขดังกล่าวจะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ

$$\frac{\beta_{M6}}{\beta_{M8}} = \frac{\beta_{M7}}{\beta_{M8}} = \frac{1}{2}\frac{\beta_{M3}}{\beta_{M9}} \tag{2.15}$$

และค่าทรานซิสเตอร์ทางอินพุตจะต้องเหมือนกันทุกประการ นั่นคือ

$$\beta_{M4} = \beta_{M5},\ \beta_{M6} = \beta_{M7} \tag{2.16}$$

นอกจากนี้จากความสัมพันธ์ของกระแส

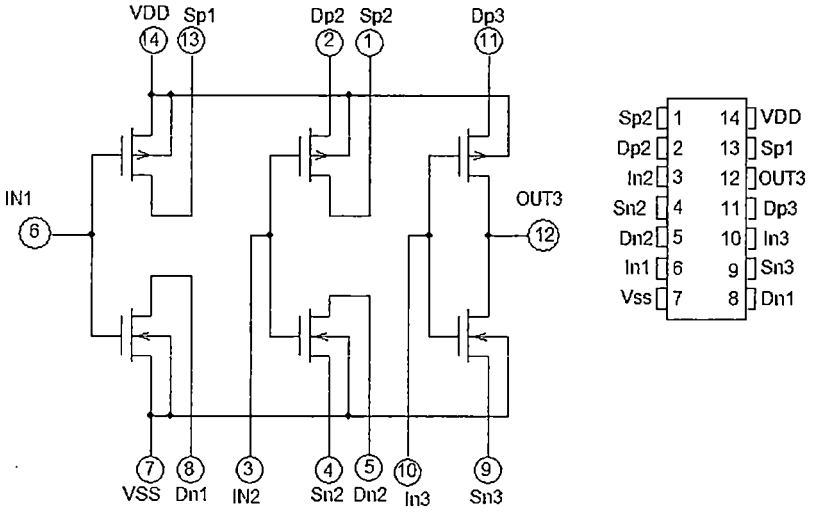
$$\beta_{M8} = 2\beta_{M7} = \beta_{M6} \tag{2.17}$$

จากความสัมพันธ์ $\beta = \beta_0\left(\frac{W}{L}\right) = \mu C_{ox}\left(\frac{W}{L}\right)$

โดยทั่วไปสำหรับ มอสเฟต แต่ละตัว μ และ C_{ox} จะมีค่าเท่าๆ กัน ดังนั้นเงื่อนไขตามสมการที่ 2-15 ถึง 2-17 จะกำหนดได้ง่ายๆ จากอัตราส่วน W/L

2.2.5 ไอซี CD4007

โครงสร้างภายในไอซี CD4007 ประกอบไปด้วย NMOS และ PMOS ทรานซิสเตอร์ โดยมี NMOS และ PMOS ที่ใช้งานได้อิสระอย่างละ 2 ตัว และมี อินเวอร์เตอร์ 1 คู่ อยู่ภายในไอซี



ภาพที่ 2.25 โครงสร้างภายใน CD4007

ซึ่งสามารถใช้ CMOS ของไอซี CD4007 มาต่อเป็นวงจรต่าง ๆ เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรรวมได้ โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้ไอซีดังกล่าวมาสร้างเป็นวงจรจริงในแต่ละใบงานตามวงจรที่กำหนดขึ้นเพื่อศึกษาการทำงานขององค์ประกอบของวงจรรวมโดยใช้เทคโนโลยีของ CMOS

2.3 กรอบแนวความคิด

การสร้างชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอสเบื้องต้นนี้ ผู้วิจัยได้ใช้กรอบแนวความคิดของ วัลลภ จันทร์ตระกูล. (2530 : 25-45, 2552 : 27) มาใช้ในการวิจัยเพื่อสร้างและหาประสิทธิภาพของชุดทดลองโดยมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.3.1 กำหนดจุดมุ่งหมายในการนำชุดทดลองไปใช้ในการสอน

2.3.2 วิเคราะห์และตัดสินใจในการเลือกวัสดุชิ้นส่วนประกอบของอุปกรณ์

2.3.3 การเขียนและออกแบบวงจร

2.3.4 การสร้างต้นแบบและตรวจสอบการตัดสินใจเลือกอุปกรณ์

2.3.5 ใบงานทดลองเป็นใบสั่งงานให้กับนักศึกษา สิ่งที่ต้องมีในใบงานทดลองมีดังนี้

2.3.5.1 วัตถุประสงค์ของการปฏิบัติที่ชัดเจน

2.3.5.2 มีรายการเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการปฏิบัติ

2.3.5.3 มีลำดับขั้นตอนการปฏิบัติงานที่ถูกต้อง

2.3.5.4 มีวงจรที่ใช้ในการปฏิบัติ

2.3.5.5 มีข้อควรระวังในการปฏิบัติ

2.3.5.6 คำถามที่กระตุ้นความคิดของผู้เรียน

2.3.5.7 วิเคราะห์เนื้อหาวิชาปฏิบัติ

2.3.6 การทดลองถูกนำไปใช้ในสถานศึกษา

2.3.7 การปรับปรุงข้อมูล

2.3.8 ขั้นตอนการหาประสิทธิภาพ

2.4 การสอนภาคปฏิบัติ

การสอนแบบทดลอง (Laboratory Instruction) คือ กระบวนการที่ผู้สอนพยายามสร้างกิจกรรมหรือสถานการณ์เพื่อให้ผู้เรียนได้สัมผัสและได้รับประสบการณ์จากการปฏิบัติทดลองรวมทั้งเพื่อให้ผู้เรียนแก้ปัญหา พิสูจน์ข้อเท็จจริงจากทฤษฎีที่ได้มีการค้นพบแล้วและเกิดการเรียนรู้เกิดประสบการณ์ตรงเกี่ยวกับสิ่งที่ต้องนำไปปฏิบัติสามารถพัฒนาทักษะการใช้เครื่องมือ รวมทั้งสามารถประยุกต์หลักการที่ใช้ในห้องทดลองกับงานจริงในภาคสนามได้ ทั้งนี้เนื่องจากในการเรียนรู้นี้ผู้เรียนจะทำการทดลองตามเนื้อหาทฤษฎีที่ได้เรียนมาโดยใช้วิธีการสอบสวนค้นคว้าและปฏิบัติการทดลอง ส่วนผู้สอนจะต้องเตรียมพร้อมในเรื่องของใบประลองหรือใบงานทดลอง ผลการทดลอง (Lab Sheet) ซึ่ง

ประกอบด้วย วัตถุประสงค์ รายการเครื่องมือและอุปกรณ์ ลำดับขั้นการทดลองผลการทดลอง รวมทั้งคำถามปัญหาและสิ่งอื่นๆ ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จากนั้นผู้สอนจะทำการควบคุมการทดลองจนกระทั้งผู้เรียนสามารถปฏิบัติได้ด้วยตนเอง และจะทำการอภิปรายผลการทดลองร่วมกันระหว่างผู้เรียนและผู้สอน (ชัชวาล มูลศรี. 2540 : 8)

โดยสรุป การสอนแบบทดลอง (Laboratory Instructions) คือ กระบวนการที่ผู้สอนจัดกิจกรรมหรือสร้างสถานการณ์ เพื่อให้ผู้เรียนได้รู้จักสังเกต สามารถพิสูจน์กฎเกณฑ์ข้อเท็จจริงจากทฤษฎีที่มีการค้นพบมาแล้ว รวมทั้งสามารถประยุกต์หลักการที่ใช้ในห้องทดลองแก้ปัญหากับงานจริงในภาคสนามได้ ทั้งนี้โดยใช้วิธีการสอบสวนค้นคว้าและปฏิบัติการทดลองเพื่อให้เกิดการเรียนรู้เกิดประสบการณ์ตรงจากการปฏิบัติการทดลอง

2.4.1 ประโยชน์และความสำคัญของการสอนแบบทดลอง

ประโยชน์และความสำคัญของการสอนแบบทดลองมีดังนี้คือ

2.4.1.1 เพื่อพิสูจน์เกี่ยวกับหลักการ กฎ สูตร และคุณสมบัติของอุปกรณ์

2.4.1.2 เพื่อพัฒนาทักษะทางสมอง เช่น การวิเคราะห์ การสอบสวน และการแก้ปัญหา

2.4.1.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ

2.4.1.4 เพื่อศึกษาเรื่องเกี่ยวข้องพฤติกรรมภายในที่สำคัญของอุปกรณ์เครื่องมือ

2.4.1.5 เพื่อเป็นการฝึกหัดการทำงานเป็นขั้นตอน

2.4.1.6 เพื่อให้รู้จักคุ้นเคยกับกลไกของเครื่องมือและอุปกรณ์

2.4.1.7 เพื่อพัฒนาความสามารถในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์

2.4.1.8 เพื่อพัฒนาความรอบคอบในการทำงาน

2.4.1.9 เพื่อเสริมสร้างจิตสำนึกในการรักษาความปลอดภัย

2.4.1.10 เพื่อประยุกต์หลักการที่ใช้ในห้องทดลองกับงานจริงใน ภาคสนามได้

2.4.1.11 เพื่อให้ผู้เรียนได้รับประสบการณ์ตรง

2.4.1.12 เพื่อพัฒนาความสามารถของผู้เรียนในการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างความคิด หลักการความรู้ต่างๆรวมทั้งเพื่อทำให้ผู้เรียนมองภาพรวมในเนื้อหา ของวิชานั้นได้

ซึ่งประโยชน์และความสำคัญของการสอนแบบทดลองก็เพื่อพิสูจน์เกี่ยวกับหลักการกฎสูตร คุณสมบัติของอุปกรณ์ มีความคุ้นเคยกับการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ การทำงานเป็นขึ้นตอนมีความรอบคอบและความปลอดภัยในการทำงาน และนำเอาความรู้หลักการ ประสบการณ์ตรงที่ได้จากการทดลองไปประยุกต์ใช้กับงานจริงในภาคสนามได้ (ชัชวาล มูลศรี. 2540: 10-11)

2.5 การหาประสิทธิภาพของชุดทดลอง

การประเมินของชุดทดลอง จะประเมินจากผลสัมฤทธิ์ด้านความรู้ของกลุ่มตัวอย่าง โดยการเปรียบเทียบ คะแนนเฉลี่ยร้อยละ จากการทำแบบฝึกหัด (Exercise) ระหว่างการใช้ชุดการสอน แต่

ละหน่วยกับคะแนนจากการทำแบบทดสอบรวม (Post-test) หลังจากการฝึกหรือการเรียน เสร็จสิ้นลง โดยใช้สูตร (E_1 / E_2) และมีเกณฑ์กำหนดไม่น้อยกว่า 80/80 (วัลลภ จันทร์ตระกูล.2552:27)

สำหรับการคำนวณเพื่อประเมินค่าประสิทธิภาพของสื่อการสอนหาได้จากสูตรดังนี้ (วัลลภ จันทร์ตระกูล.2552:27)

$$E_1 = \left[\frac{\sum X}{\frac{N}{A}} \right] \times 100$$

$$E_2 = \left[\frac{\sum Y}{\frac{N}{B}} \right] \times 100$$

เมื่อ E_1 คือ ประสิทธิภาพของกระบวนการที่จัดไว้ในชุดการสอน

E_2 คือ ประสิทธิภาพของชุดการสอน

$\sum X$ คือ คะแนนรวมของผู้เรียนจากการฝึกปฏิบัติระหว่างการทดลอง

$\sum Y$ คือ คะแนนรวมของผู้เรียนจากแบบทดสอบหลังเรียน

A คือ คะแนนเต็มรวมของผู้เรียนจากการปฏิบัติระหว่างการทดลอง

B คือ คะแนนเต็มรวมของผู้เรียนจากแบบทดสอบหลังเรียน

N คือ จำนวนผู้เรียนทั้งหมด

2.6 การหาค่าความเที่ยงตรงของเครื่องมือวิจัย

ศุภกิจ วงศ์วิวัฒน์นุกิจ (อ้างอิงจาก พจนานุกรมศัพท์การวิจัยและสถิติ. 2550:281) ให้ความหมายของ ความตรงว่า เป็นระดับความสามารถของแบบวัดหรือเครื่องมือในการวัดค่าของสิ่ง ที่ต้องการวัดได้ตรงความเป็นจริงหรือตรงตามวัตถุประสงค์ที่นักวิจัยต้องการวัด ค่าที่วัดได้นั้นควรมีความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนจากการวัดต่ำ

เกียรติสุดา ศรีสุข (2552 : 138) กล่าวว่า ความเที่ยงตรง หมายถึง การที่เครื่องมือสามารถวัดได้ตรงและครบถ้วน ในสิ่งที่ต้องการศึกษาหรือตรงตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย การใช้เครื่องมือในการรวบรวมข้อมูลที่มีความเที่ยงตรงสูงจะทำให้ผู้วิจัยสามารถวัดในสิ่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องและครบถ้วน

บุญธรรม กิจปรีดาบริสุทธิ์ (2549 : 258) ให้ความหมายของความเที่ยงตรงว่า เป็นการวัด ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ และพฤติกรรมที่ต้องการให้วัด วัดได้ครอบคลุมครบถ้วน ตามเนื้อหาที่ต้องการวัด และวัดได้ถูกต้องตรงความเป็นจริง

จิตราภา กุณฑลบุตร (2550 : 185) การตรวจสอบความตรงของเครื่องมือ คือการพิจารณาว่าเครื่องมือที่จะนำไปใช้มีระดับความสามารถในการวัดตรงตามสิ่งที่ต้องการวัดหรือไม่

เชิดศักดิ์ โฆวาสินธ์ (2549 : 195) ให้นิยามความเที่ยงตรง คือ ความเหมาะสม สมบูรณ์ มีประโยชน์ ในการอ้างอิงสิ่งที่เป็นเป้าหมายเฉพาะ จากผลการวัดหรือคะแนน

บุญเรียง ขจรศิลป์ (2545 : 161) กล่าวว่า ความตรงของเครื่องมือ (Validity) คือ คุณสมบัติ ของเครื่องมือที่สามารถวัดได้ในสิ่งที่ต้องการวัดตามวัตถุประสงค์หรือจุดหมายใดจุดหมายหนึ่ง อาจจะไม่มีความตรงตามวัตถุประสงค์อื่นๆ

สุวิมล ติรกานันท์ (2551 : 163) กล่าวว่า ความเที่ยงตรง หมายถึง ความแม่นยำของเครื่องมือในการวัดสิ่งที่ต้องการจะวัดซึ่งสามารถบอกถึงสภาพที่แท้จริงของตัวแปรที่ศึกษา

รัตนะ บัวสนธ์ (2551 : 163) กล่าวว่าความเที่ยงตรง หมายถึง คุณสมบัติของเครื่องมือเก็บรวบรวมข้อมูล แล้วจะทำให้ได้ข้อมูลแม่นยำตรงตามต้องการที่จะได้

ศิริชัย กาญจนวาสี (2548 : 99) ให้ความหมายของความเที่ยงตรงว่า เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเครื่องมือวัดผล ซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณภาพด้านความถูกต้องของผลที่ได้จากการวัด ทำให้สามารถ นำคะแนนที่ได้ไปแปลความหมายถึงสิ่งที่มุ่งวัดได้อย่างเหมาะสม

โดยสรุปความเที่ยงตรง (Validity) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของเครื่องมือ เครื่องมือทุกชนิดต้องมีความเที่ยงตรง โดยสามารถวัดได้ตรงกับจุดมุ่งหมายที่ต้องการหรือวัดในสิ่งที่ต้องการวัดได้ถูกต้องแม่นยำ ครบถ้วนตามหลักการวัดผล

2.6.1 เทคนิคการหาคุณภาพการคำนวณและการแปลผลความเที่ยงตรงและตัวอย่างการคำนวณ การหาความเที่ยวตรงของเครื่องมือในการวิจัยประเภทต่างๆ ที่นิยมใช้มีวิธีดังนี้

2.6.1.1 ความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหาโดยใช้ผู้เชี่ยวชาญ(Expert) การตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหาจะต้องดำเนินการก่อนนำไปทดลองใช้ ทำได้โดยการนำนิยามเชิงปฏิบัติการโครงสร้างการสร้างข้อคำถามควบคู่กับแบบสอบถามให้ผู้เชี่ยวชาญพิจารณาความสอดคล้อง การให้โครงสร้างข้อคำถามแก่ผู้เชี่ยวชาญทำให้ผู้เชี่ยวชาญทราบที่มาของข้อคำถามแต่ละข้อว่ามาจากประเด็นใด ครอบคลุมเนื้อหาในเรื่องนั้นหรือไม่ จากนั้นให้ผู้เชี่ยวชาญกรอกแบบฟอร์มการพิจารณา จำนวนผู้เชี่ยวชาญควรมีตั้งแต่ 3 คนขึ้นไปเพื่อหลีกเลี่ยงความคิดเห็นที่แบ่งเป็น 2 ด้าน เมื่อได้รับการพิจารณาจากผู้เชี่ยวชาญ ผู้วิจัย จะนำมาคำนวณค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามเป็นประเด็นที่ต้องการทราบ

2.6.1.2 การหาดัชนีความสอดคล้องระหว่างแบบทดสอบกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม (พูลทรัพย์ นาคนาคา. 2552 : 269-270) ใช้สูตรดังนี้

$$IOC = \frac{\sum R}{N}$$

เมื่อ IOC คือ ดัชนีความสอดคล้อง (Index of item-Objective Congruence)

R คือ คะแนนความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ

N คือ จำนวนผู้ทรงคุณวุฒิ

หลักเกณฑ์กำหนดความคิดเห็นดังนี้

คะแนน +1 หมายถึง คำถามหรือแบบทดสอบนั้นความสอดคล้องกับจุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

คะแนน 0 หมายถึง ไม่แน่ใจว่าคำถามหรือแบบทดสอบความสอดคล้องกับจุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

คะแนน -1 หมายถึง คำถามหรือแบบทดสอบนั้นไม่มีความสอดคล้องกับจุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เกณฑ์การพิจารณา

ถ้า IOC มากกว่าหรือเท่ากับ .50 แสดงว่าข้อคำถามหรือแบบทดสอบนั้นวัดได้ตรงกับจุดมุ่งหมาย

ถ้า IOC น้อยกว่า .50 แสดงว่าข้อคำถามหรือแบบทดสอบนั้นวัดไม่ตรงกับจุดมุ่งหมาย

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการสร้างชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส โดยงานวิจัยแต่ละฉบับจะเป็นการนำเทคโนโลยีซีมอสมาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ดังมีรายละเอียดโดยสรุปดังนี้

ศักดิ์ศรี แก่นสม (2545 : บทคัดย่อ) นำเสนอเรื่องการสร้างและประเมินประสิทธิภาพของสื่อเรื่องชุดทดลองเชื่อมโยงทางฮาร์ดแวร์ของเครื่องโปรเซสเซอร์ Z-80 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในครั้งนี้คือ นักศึกษาระดับปริญญาตรี เอกเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม จากสถาบันราชพัดพระนคร ปีการศึกษา 2545 จำนวน 32 คน ผลการศึกษาโดยทำการวิเคราะห์และหาประสิทธิภาพของสื่อ โดยใช้ค่าเฉลี่ยร้อยละและหาความเชื่อมั่นของแบบทดสอบ โดยใช้สูตรของ Kuder Richardson ผลปรากฏว่า สื่อชุดทดลองมีประสิทธิภาพ 83.72/83.43 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ที่ตั้งไว้

ชมัยพร พจนสุวรรณชัย (2547 : บทคัดย่อ) นำเสนอหลักการออกแบบวงจรหาค่าสูงสุดและวงจรหาค่าต่ำสุดในโมดกระแสหลายอินพุต บนพื้นฐานของเทคโนโลยีทรานซิสเตอร์แบบซีมอส ที่มีการทำงานในช่วงกระแสอิ่มตัวเป็นหลัก วงจรที่ได้นำเสนอนี้มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาต์พุตต่ำ มีความเหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย และมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประมวลผลสัญญาณทางแอนาลอก การทดสอบสมรรถนะของวงจรที่ได้

พัฒนาขึ้นจะทำการเลียนแบบการทำงานด้วยโปแกรม PSPICE ผลการทดสอบสามารถยืนยันถึงช่วงปฏิบัติการและความถูกต้องในการทำงานของวงจรที่ออกแบบเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอไว้

เลิศศักดิ์ ยุทธสุขประเสริฐ (2549 : บทคัดย่อ) ได้ทำเรื่องการออกแบบวงจรควบคุมความต้านทานชนิดต่อลงดินด้วยเทคโนโลยีซีมอส โดยมีการชดเชยอุณหภูมิ โดยวงจรที่นำเสนอประกอบไปด้วยมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในช่วงโอห์มิคและช่วงอิ่มตัว โดยวงจรควบคุมความต้านทานชนิดต่อลงดินนี้ประกอบด้วยวงจรย่อยคือ วงจรลดทอนแรงดัน วงจรต่างแรงดัน และวงจร Voltage inverter วงจรเหล่านี้เสมือนแหล่งกำเนิดแรงดันไม่อิสระที่ทำหน้าที่ไบอัสให้โอห์มิคทรานซิสเตอร์กำจัดเทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้น Threshold voltage เพื่อชดเชยผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิ ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ว่า การนำวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน มาประยุกต์เป็นวงจรกรองความถี่ ซึ่งสามารถปรับค่าความถี่ตอบสนองได้ และสามารถเลื่อนช่วงของความถี่ตอบสนองได้ด้วย

คเชนท์ ขาวงาม (2550 : บทคัดย่อ) ได้นำเสนอเกี่ยวกับวงจรซีมอสด้วยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเพื่อแปรค่าความต้านทาน โดยใช้การกำจัดเทอมในส่วนของไม่เป็นเชิงเส้นออกไป และเทคนิคการแยกผลกระทบที่มาจากอุณหภูมิ วงจรที่ใช้จะประกอบด้วย ทรานซิสเตอร์มอส 17 ตัว ที่ทำงานใน ช่วงโอห์มิคและในช่วงที่อิ่มตัว ซึ่งมันจะประกอบด้วยวงจรต้านทานแรงดัน วงจรหักลบแรงดัน และวงจรพลิกกลับแรงดันโดยวงจรเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดที่ต่าง ๆ กัน ที่จะป้อนให้แก่โอม์มิคทรานซิสเตอร์เทอมของการไม่เป็นเชิงเส้น และขอบเขตของแรงดันจะกำจัดออกไปเพื่อที่จะให้เป็นเชิงเส้น และทำผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิให้มีค่าน้อยที่สุด โดยจะพิจารณาในขั้นลำดับที่หนึ่ง ของวงจรกรองความถี่ต่ำ ที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ เป็นการประยุกต์ใช้งาน เพื่อยืนยันความเป็นจริงของวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าเพื่อการปรับเปลี่ยนค่าความต้านทาน ซึ่งในลักษณะการทำงานจะคิดที่ ความเป็นเชิงเส้นอย่างมาก และการแยกผลกระทบจากอุณหภูมิออกไปแล้ว

อภิรักษ์ เสือเดช (2551 : บทคัดย่อ) นำเสนอวงจรป้อนกลับโหมดร่วมที่มีช่วงปฏิบัติงานกว้างแบบซีมอสและการประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรขยายผลต่างเสมือน และวงจรขยายผลต่างกระแส วงจรที่นำเสนออาศัยหลักการของวงจรตรวจจับสัญญาณโหมดร่วมโดยใช้วงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์ และวงจรขยายสัญญาณโหมดร่วมที่ประกอบด้วยวงจรขยายทรานสอิมพีแดนซ์ และวงจรขยาย ทรานสคอนดัคแตนซ์ เพื่อให้ได้รับอัตราขยายลูปของสัญญาณโหมดร่วมสูงและแบนด์วิดท์กว้าง จากการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรขยายผลต่างกระแสเห็นได้ว่าวงจรสามารถกำจัดสัญญาณโหมดร่วมได้ดี

ณัฏฐพงศ์ ศิโรโรจน์ (2552 : บทคัดย่อ) การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้าง และหาประสิทธิภาพชุดทดลองวงจรไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับใบงานทดลอง และเพื่อศึกษาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนด้วยชุดทดลองที่สร้างขึ้นมาใหม่ กลุ่มตัวอย่างในการวิจัยเป็นนักเรียนระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นที่ 1 แผนกช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคกระบี่ จำนวน 36 คน โดยสุ่มตัวอย่างแบบง่าย แบ่งเป็น 2 กลุ่มๆ ละ 18 คน การหาประสิทธิภาพของชุดทดลองทำด้วยวิธี E1/E2 ผลการวิเคราะห์พบว่าชุดทดลองที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพ 83.21/81.66 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ มาตรฐาน

80/80 ผู้เรียนมีพฤติกรรมการปฏิบัติการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดี และมีความพึงพอใจในการเรียนด้วยใบงานทดลองร่วมกับชุดทดลองที่สร้างขึ้นอยู่ในระดับมาก

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อสร้างและหาประสิทธิภาพชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสโดยมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.3 ขั้นตอนในการสร้างเครื่องมือ

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.6 สถิติที่ใช้ในการวิจัย

3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

3.1.1 ประชากร

ประชากรที่ใช้ในการวิจัย เป็นนักศึกษาหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ครุศาสตร์วิศวกรรม) แขนงอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม ที่ลงทะเบียนเรียนวิชาการปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ในการศึกษา 2554 จำนวน 20 คน

3.1.2 กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างในการวิจัยเป็นวิจัย เป็นนักศึกษาหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ครุศาสตร์วิศวกรรม) แขนงอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จำนวน 12 คน คัดเลือกโดยวิธีการสุ่มแบบเจาะจง

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อสร้างและหาประสิทธิภาพชุดทดลองโดย เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ผู้วิจัยได้สร้างขึ้นเองประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

3.2.1 ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

3.2.2 ใบงานทดลองสำหรับให้นักศึกษาปฏิบัติการทดลอง โดยในแต่ละใบงานทดลองจะมีองค์ประกอบดังนี้

3.2.2.1 หัวข้อใบงานทดลอง

3.2.2.2 วัตถุประสงค์ใบงานทดลอง

2.2.2.3 เนื้อหาทฤษฎี

2.2.2.4 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.2.5 ลำดับขั้นการทดลอง

2.2.2.6 แบบฝึกหัดท้ายใบงานทดลอง

3.2.3 แบบประเมินคุณภาพของชุดทดลองปฏิบัติ

3.2.4 แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนในการปฏิบัติ

3.3 ขั้นตอนในการสร้างเครื่องมือ

3.3.1 ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

ขั้นตอนการสร้างชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสสรุปได้ดังรูปที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1.1 ศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาทางทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งานของอุปกรณ์และชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสและสอบถามอาจารย์ผู้ที่สอนรายวิชาเพื่อกำหนดแนวทางในรายละเอียดของหัวข้อเนื้อหาต่างๆของชุดทดลองปฏิบัติ รวมถึงศึกษาเอกสารที่เกี่ยวกับหลักการและวิธีการสร้างสื่อการเรียนการสอนประเภทชุดทดลองปฏิบัติ ค้นคว้าเอกสารวิทยานิพนธ์และตำราต่างๆ เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการทำงานวงจรการทดลอง และการคำนวณการออกแบบวงจร

3.3.1.2 วิเคราะห์และตัดสินใจเลือกชิ้นส่วนประกอบของอุปกรณ์ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานของชุดทดลอง

3.3.1.3 ออกแบบและสร้างชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

3.3.1.4 นำชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสเสนออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมตรวจสอบ หากมีข้อบกพร่องทำการปรับปรุงแก้ไข

3.3.1.5 นำชุดชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสไปให้ผู้ทรงคุณวุฒิด้านชุดทดลองตรวจสอบและประเมินคุณภาพ ดังมีรายนามต่อไปนี้

1. ดร.ไพบูลย์ พวงวงศ์ตระกูล อาจารย์ประจำสาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2. ผศ.พิชญ์สินี มะโน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3. ผศ.สุชิน อาจหาญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

4. ดร.สมชาย หมื่นสายญาติ อาจารย์ประจำสาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

5. อาจารย์นรินทร์ ธรรมารักษ์วัฒนะ ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

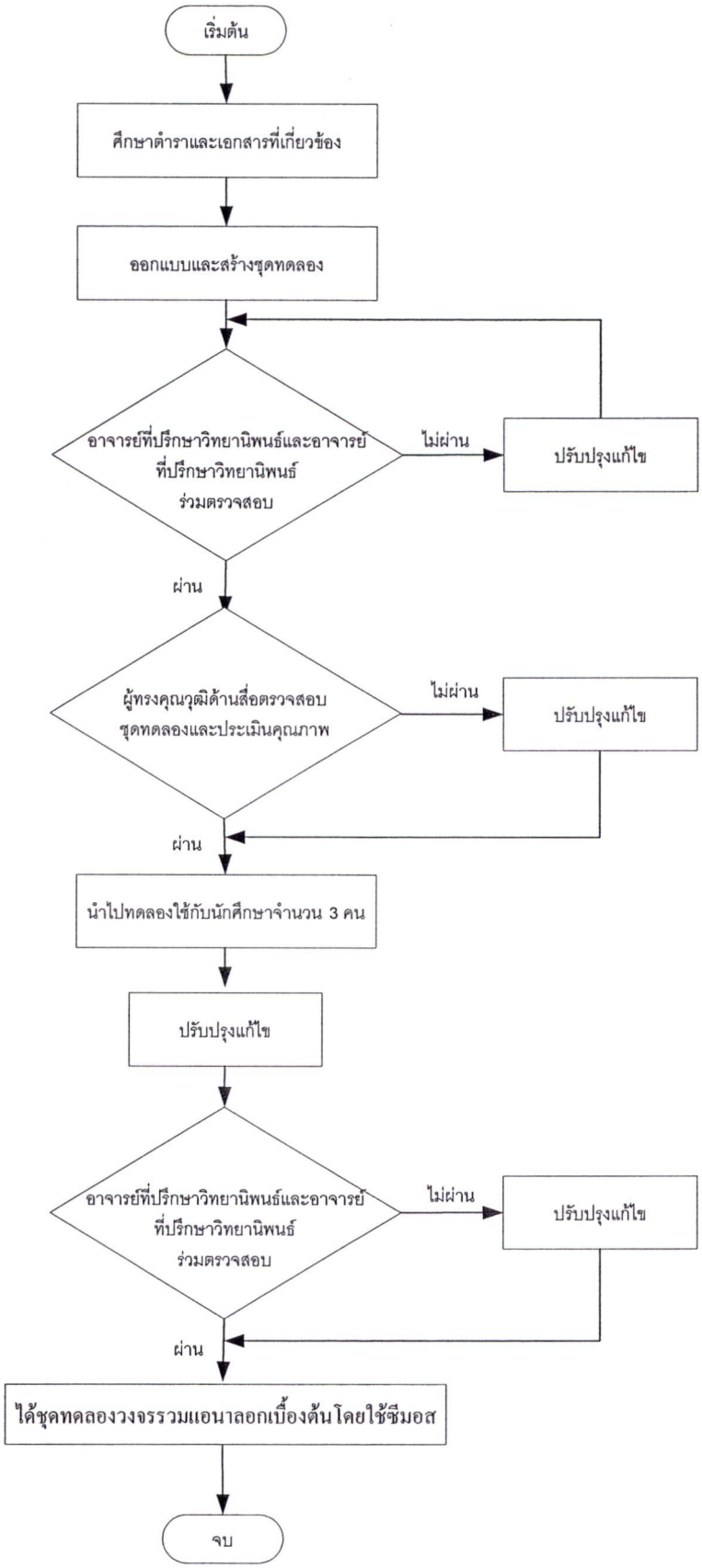
โดยผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 5 ท่านได้ประเมินด้านชุดทดลองที่สร้างขึ้นซึ่งผลการประเมินด้านชุดทดลองมีคุณภาพอยู่ในระดับดีมากมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 4.50 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.68

3.3.1.6 นำไปทดลองใช้กับ นักศึกษา สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม แขนงอิเล็กทรอนิกส์ ที่เคยเรียนวิชานี้ผ่านมาแล้ว จำนวน 3 คน เป็นกลุ่มทดลอง โดยคัดเลือกจากนักศึกษาที่มีผลการเรียนอยู่ในระดับเก่ง 1 คน ปานกลาง 1 คน และอ่อน 1 คน โดยสังเกตพฤติกรรมดังนี้

ในระหว่างที่ทำการทดลองผู้วิจัยได้สังเกตพฤติกรรมของนักศึกษาแต่ละคน ผลปรากฏว่านักศึกษาที่มีผลการเรียนดีมีข้อซักถามเพียงเล็กน้อยเกี่ยวกับขั้นตอนการทดลองการเชื่อมต่อวงจรและสามารถทำการทดลองผ่านได้ในแต่หัวข้อ ส่วนนักศึกษาที่มีผลการเรียนระดับปานกลางและต่ำไม่เข้าใจการทดลองในบางจุด รวมถึงมีการซักถามในข้อที่สงสัยเพื่อหาสาเหตุ เช่นการเชื่อมต่อวงจร การกำหนดค่าอุปกรณ์ การปรับค่ากระแส และกำหนดย่านวัดของเครื่องมือที่ไม่ถูกต้อง เนื่องจากขาดความรอบคอบและไม่อ่านลำดับขั้นตอนของการทดลอง ผู้วิจัยได้บันทึกพฤติกรรมต่างๆของนักศึกษาเอาไว้เพื่อนำมาปรับปรุงแก้ไข

3.3.1.7 นำข้อบกพร่องที่ได้มาทำการปรับปรุงแก้ไขเสร็จโดยอธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับการกำหนดค่าอุปกรณ์ การปรับค่าต่างๆของอุปกรณ์และวิธีการใช้เครื่องมือแล้วเสนออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมตรวจสอบความเหมาะสมอีกครั้ง

3.3.1.8 นำชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสไปใช้กับกลุ่มตัวอย่างในการวิจัยโดยนำคะแนนจากแบบสังเกตพฤติกรรมระหว่างการทดลองของนักศึกษาทั้งหมดรวมกับคะแนนของแบบทดสอบท้ายการทดลองมาหาค่าเฉลี่ยร้อยละ คิดเป็นประสิทธิภาพ E_1 และหลังจากทดลองครบทุกใบงานแล้วนักศึกษาจะต้องทำใบงานรวมเพื่อนำคะแนนจากแบบสังเกตพฤติกรรมระหว่างการทดลองใบงานรวมของนักศึกษาทั้งหมดรวมกับคะแนนของแบบทดสอบรวมมาหาค่าเฉลี่ยร้อยละ คิดเป็นประสิทธิภาพ E_2



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการสร้างชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

3.3.2 การสร้างใบงานทดลอง

ขั้นตอนการสร้างใบงานทดลอง **สรุปได้ดังรูปที่ 3.2** โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.2.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสาร ตำรา เพื่อให้ใบงานทดลองมีความสัมพันธ์กับชุดทดลองที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น และเพื่อใช้เป็นส่วนอ้างอิงการเขียนเนื้อหาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในใบงานทดลอง

3.3.2.2 การสร้างใบงานทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

1. หัวข้อใบงานทดลอง
2. วัตถุประสงค์ใบงานทดลอง
3. เนื้อหาทฤษฎี
4. เครื่องมือและอุปกรณ์
5. ลำดับขั้นการทดลอง
6. แบบฝึกหัดท้ายใบงานทดลอง

3.3.2.3 นำใบงานทดลองเสนออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมตรวจสอบ หากมีข้อบกพร่องทำการปรับปรุงแก้ไข

3.3.2.4 นำใบงานทดลองไปให้ผู้ทรงคุณวุฒิด้านใบงานทดลองตรวจสอบและประเมินคุณภาพ ดังมีรายนามต่อไปนี้

1. ดร.ไพบูลย์ พวงวงศ์ตระกูล อาจารย์ประจำสาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2. ผศ.พิชญ์สินี มะโน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรมคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3. ผศ.สุชิน อาจหาญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

4. ดร.สมชาย หมื่นสายญาติ อาจารย์ประจำสาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

5. อาจารย์นรินทร์ ธรรมารักษ์วัฒนะ ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.3.2.5 ปรับปรุงและแก้ไขเนื้อหาของใบงานทดลองตามที่ผู้ทรงคุณวุฒิแนะนำดังนี้

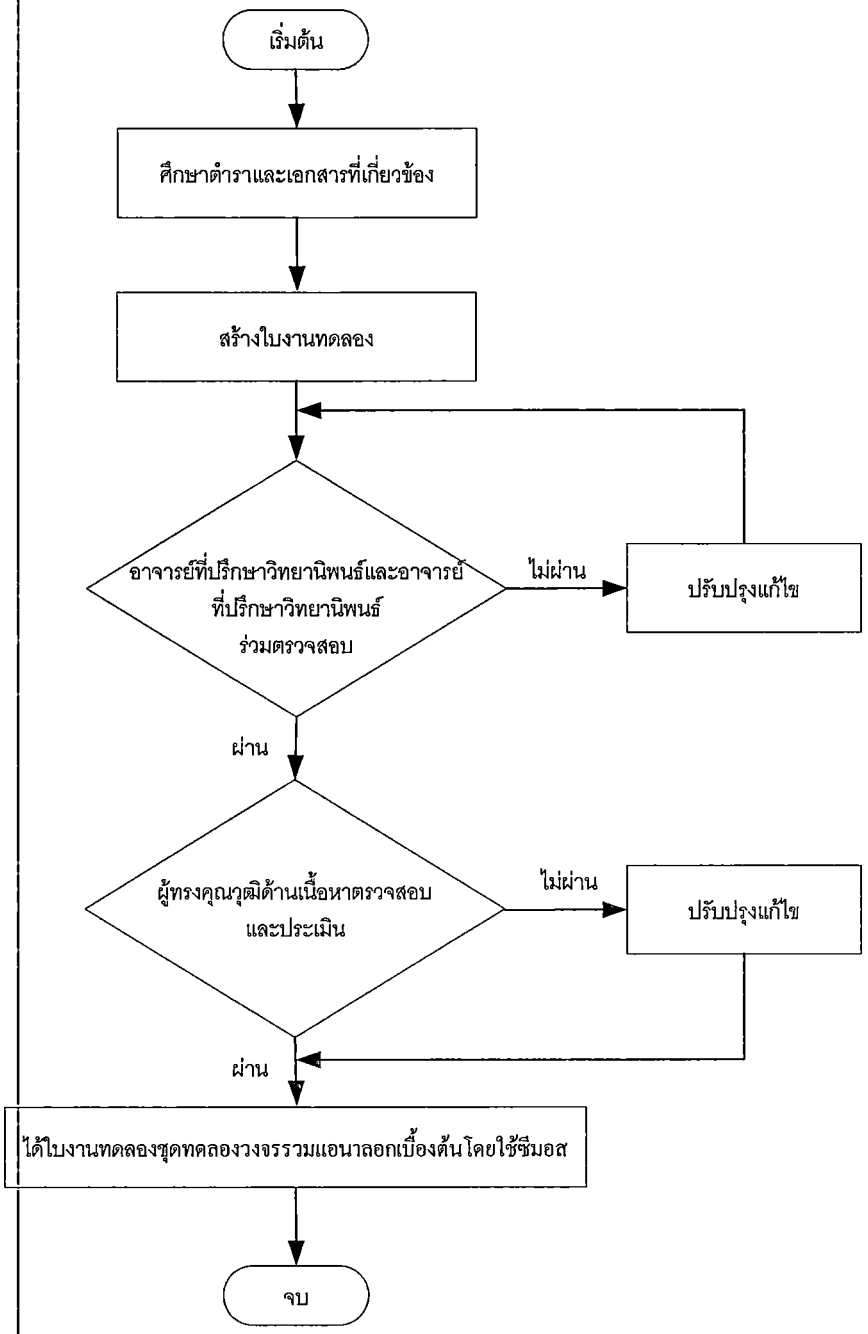
1.ปรับปรุงรูปภาพภาพวงจรในใบงานทดลองให้สอดคล้องกับการทดลอง

2.ปรับปรุงลำดับขั้นตอนการทดลองให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

3.ปรับปรุงแบบฝึกหัดท้ายใบงานทดลองให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อแก้ไขเรียบร้อยแล้วนำไปให้อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมตรวจสอบอีกครั้ง

3.3.2.6 นำใบงานชุดทดลองไปใช้กับกลุ่มตัวอย่างเพื่อการวิจัยต่อไป



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสร้างใบงานทดลอง

3.3.3 การสร้างแบบประเมินคุณภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

การสร้างแบบประเมินคุณภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังรูปที่ 3.3 โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.3.1 รวบรวมข้อมูลและศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดเป็นแนวทางการสร้างแบบประเมินคุณภาพชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

กำหนดประเด็นในการประเมินโดยแบ่งแยกเป็นเป็น 2 ด้านดังนี้

1. ด้านเนื้อหาใบงานทดลอง

2. ด้านชุดทดลอง

โดยได้กำหนดรูปแบบแบบสอบถามที่ใช้ เพื่อให้ผู้คุณวุฒิพิจารณาว่าในแต่ละประเด็นมีคุณภาพผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้หรือไม่ ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดเป็นแบบสอบถามความคิดเห็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) ตามแบบ Likert's Scale ไว้ 5 ระดับ ดังนี้

คะแนนเกณฑ์การประเมินคุณภาพด้านเนื้อหาและใบงานทดลอง

ระดับ 5 มีคุณภาพอยู่ในระดับที่ดีมาก

ระดับ 4 มีคุณภาพอยู่ในระดับที่ดี

ระดับ 3 มีคุณภาพอยู่ในระดับปานกลาง

ระดับ 2 มีคุณภาพอยู่ในระดับพอใช้

ระดับ 1 มีคุณภาพอยู่ในระดับควรปรับปรุง

คะแนนเฉลี่ยเกณฑ์การประเมินคุณภาพด้านเทคนิคการผลิตของชุดทดลอง

ค่าเฉลี่ย 4.50-5.00 มีค่าเท่ากับระดับคุณภาพดีมาก

ค่าเฉลี่ย 3.50-4.49 มีค่าเท่ากับระดับคุณภาพดี

ค่าเฉลี่ย 2.50-3.49 มีค่าเท่ากับระดับคุณภาพปานกลาง

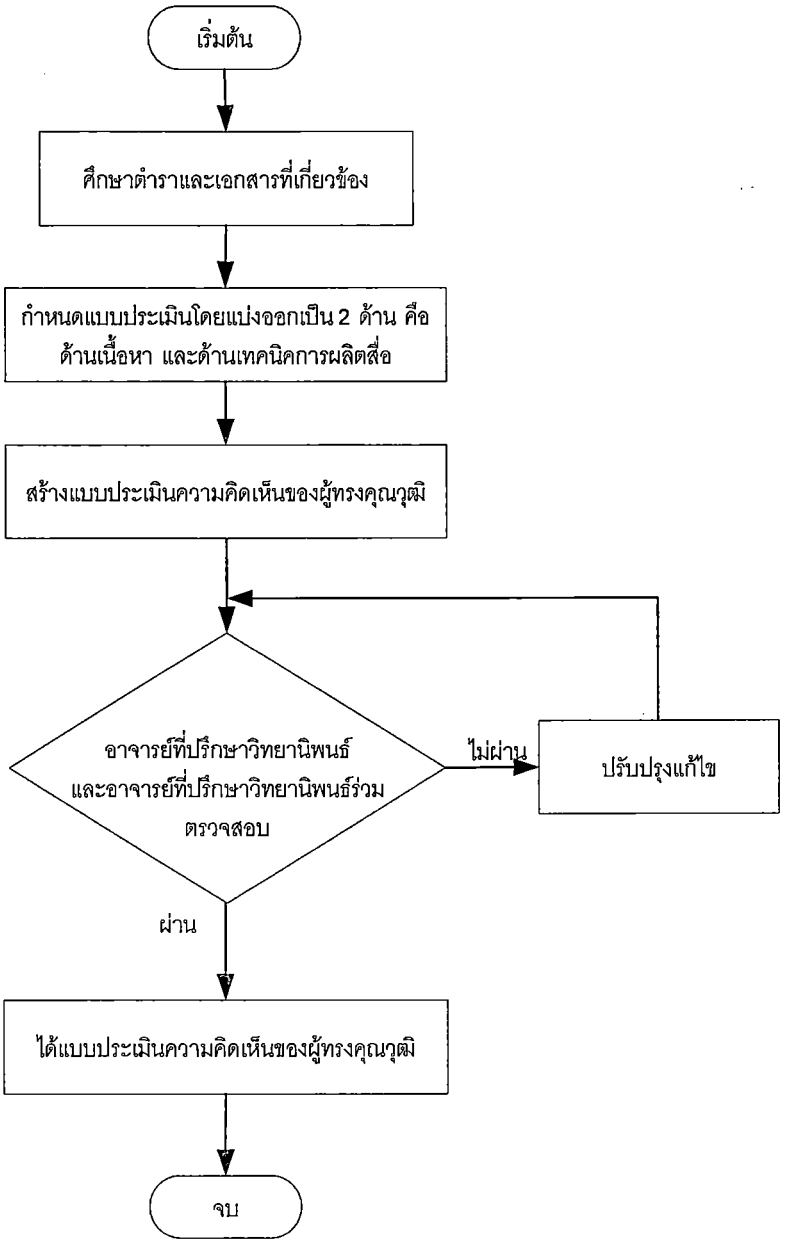
ค่าเฉลี่ย 1.50-2.49 มีค่าเท่ากับระดับคุณภาพดีพอใช้

ค่าเฉลี่ย 1.00-1.49 มีค่าเท่ากับระดับคุณภาพควรปรับปรุง

ใช้คะแนนเฉลี่ยเกณฑ์การประเมินคุณภาพตั้งแต่ 3.5 ขึ้นไป (พวงรัตน์ ทวีรัตน์ 2535:124)

3.3.3.3 สร้างแบบประเมินคุณภาพชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

3.3.3.4 นำแบบประเมินคุณภาพชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสที่ได้ให้อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมตรวจสอบแล้วทำการปรับปรุงแก้ไขเพื่อนำไปใช้จริงต่อไป



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสร้างแบบประเมินความคิดเห็นผู้ทรงคุณวุฒิด้านใบงานและด้านชุดทดลอง

3.3.4 แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

การสร้างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสามารถสรุปขั้นตอนการสร้างได้ดังแสดงในรูปที่ 3.4

3.3.4.1 ศึกษาวิธีการสร้างแบบทดสอบและวิเคราะห์จุดประสงค์การเรียนรู้ของรายวิชาเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างแบบทดสอบ

3.3.4.2 สร้างแบบทดสอบที่ใช้วัดผลสัมฤทธิ์ของผู้เรียน

3.3.4.3 นำแบบทดสอบที่ได้ให้อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมตรวจสอบหากมีข้อบกพร่องทำการปรับปรุงแก้ไข

3.3.4.4 นำแบบทดสอบที่ได้ให้ผู้ทรงคุณวุฒิหาค่าความสอดคล้องของแบบทดสอบกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม (IOC) โดยใช้หลักเกณฑ์กำหนดความคิดเห็นดังนี้

คะแนน +1 หมายถึง คำถามหรือแบบทดสอบนั้นความสอดคล้องกับจุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

คะแนน 0 หมายถึง ไม่แน่ใจว่าคำถามหรือแบบทดสอบความสอดคล้องกับจุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

คะแนน -1 หมายถึง คำถามหรือแบบทดสอบนั้นไม่มีความสอดคล้องกับจุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

การหาดัชนีความสอดคล้องระหว่างแบบทดสอบกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม (พูลทรัพย์ นาคนาคา. 2552 : 269-270) ใช้สูตรดังนี้

$$IOC = \frac{\sum R}{N}$$

เมื่อ IOC คือ ดัชนีความสอดคล้อง (Index of item-Objective Congruence)

R คือ คะแนนความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ

N คือ จำนวนผู้ทรงคุณวุฒิ

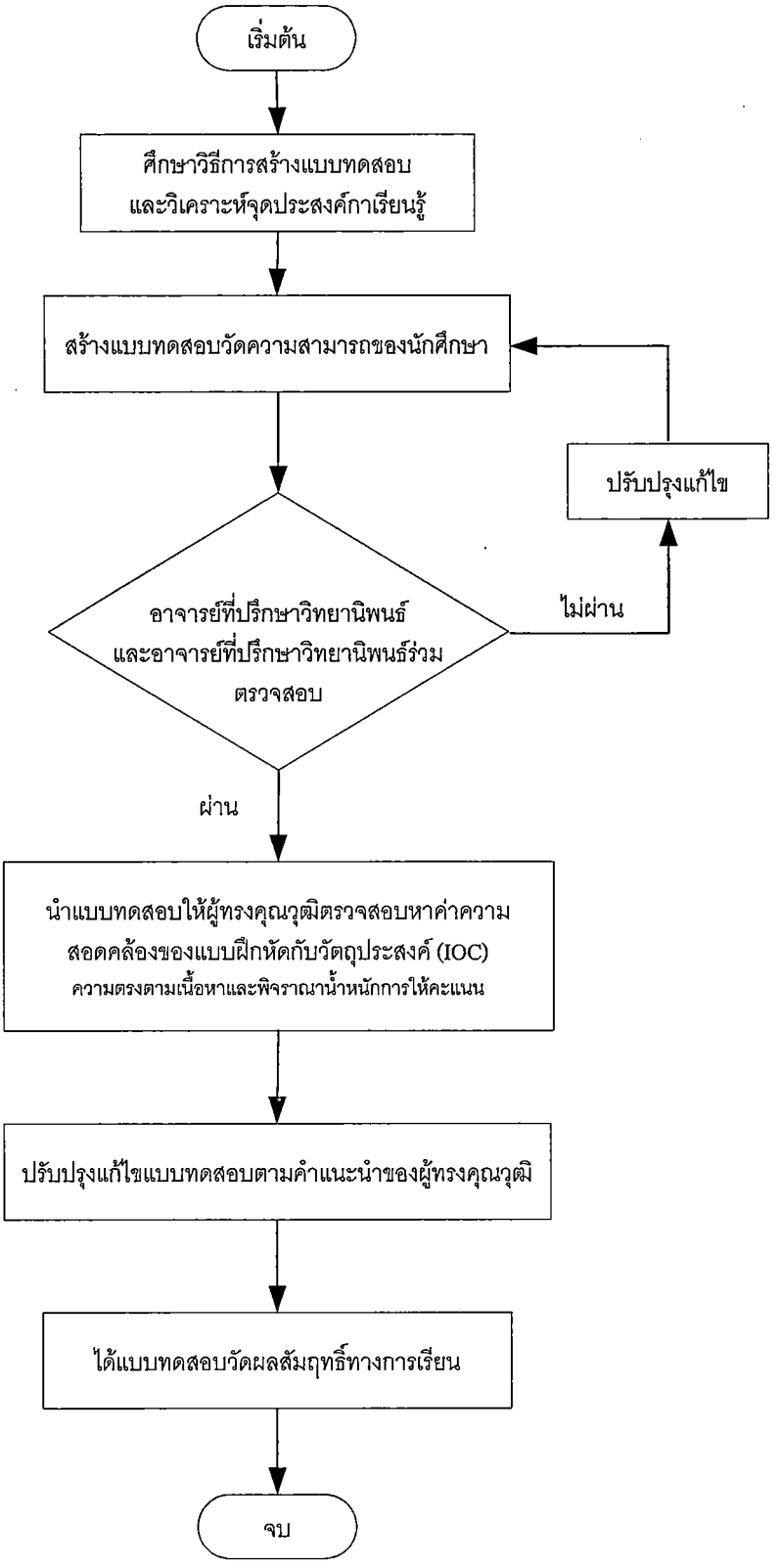
เกณฑ์การพิจารณา

ถ้า IOC มากกว่าหรือเท่ากับ .50 แสดงว่าข้อคำถามหรือแบบทดสอบนั้นวัดได้ตรงกับจุดมุ่งหมาย

ถ้า IOC น้อยกว่า .50 แสดงว่าข้อคำถามหรือแบบทดสอบนั้นวัดไม่ตรงกับจุดมุ่งหมาย

3.3.4.5 ทำการปรับปรุงแก้ไขแบบทดสอบตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

3.3.4.6 ได้แบบทดสอบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เพื่อนำไปใช้กับกลุ่มตัวอย่างในการวิจัยต่อไป



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการสร้างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ในขั้นตอนการทดลองใช้ใบงานทดลองและชุดทดลองที่สร้างขึ้น และเก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ มีลำดับขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้

3.4.1 บันทึกเสนอขอความอนุเคราะห์ให้งานบัณฑิตศึกษา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ออกหนังสือขอความร่วมมือ ในการนำเอาชุดทดลองที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นนำไปใช้ กับกลุ่มตัวอย่างที่กำหนดไว้

3.4.2 นำชุดลองและใบงานทดลองที่สร้างขึ้น ไปดำเนินการวิจัยกับกลุ่มตัวอย่างในการวิจัย ซึ่งเป็นนักศึกษาหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ครุศาสตร์วิศวกรรม) แขนงอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จำนวน 12 คน แนะนำชุดทดลองและใบงานทดลองแก่นักศึกษากลุ่มตัวอย่างทั้งหมดก่อน โดยให้ทราบถึงขอบข่ายการใช้งาน หลักการในการทำงาน ส่วนประกอบที่เกี่ยวข้อง วิธีการปฏิบัติก่อนการทดลอง และอธิบายทฤษฎีพร้อมคำแนะนำในการทดลองทุกครั้ง ก่อนลงมือทำการทดลอง

3.4.3 การวิจัยครั้งนี้มีทั้งหมด 4 ใบงานทดลอง แบ่งการทดลองเนื้อหาออก ดังนี้

ใบงานทดลองที่ 1 คุณสมบัติของซีมอส

ใบงานทดลองที่ 2 แหล่งจ่ายกระแสและวงจรสะท้อนกระแส

ใบงานทดลองที่ 3 ตัวขยายความแตกต่าง

ใบงานทดลองที่ 4 วงจรออปแอมป์สองภาค

นำคะแนนของแบบทดสอบที่ได้ระหว่างการทดลองมาหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน และหลังจากทดลองครบทั้ง 4 ใบงานทดลองแล้ว ทำการทดสอบซ้ำอีกครั้งโดยให้นักศึกษาแต่ละคนทำแบบทดสอบรวม แล้วนำข้อมูลที่ได้มาหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษารวมทุกเรื่อง นำคะแนนที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพตามเกณฑ์ 80/80 (E1/E2)

3.5การวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 การหาดัชนีความสอดคล้องระหว่างแบทดสอบกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม (พูลทรัพย์ นาคนาคา. 2552 : 269-270) ใช้สูตรดังนี้

$$IOC = \frac{\sum R}{N}$$

เมื่อ IOC คือ ดัชนีความสอดคล้อง (Index of item-Objective Congruence)

R คือ คะแนนความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ

N คือ จำนวนผู้ทรงคุณวุฒิ

จากนั้นเลือกข้อสอบที่มีดัชนีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การเรียนรู้ตั้งแต่ 0.5 ขึ้นไป เพื่อนำไปใช้งาน

3.6 สถิติที่ใช้ในการวิจัย

3.6.1 การหาคะแนนเฉลี่ย $(\overline{X})$ (รวีวรรณ ชินะตระกูล. 2538 : 151) ใช้สูตรดังนี้

$$\overline{X} = \frac{\sum X}{N}$$

เมื่อ $\overline{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยของคะแนน

$\sum$ คือ ผลรวมของคะแนน

X คือ คะแนนแต่ละจำนวน

N คือ จำนวนข้อมูล

$\sum X$ คือ ผลรวมของคะแนนแต่ละจำนวน

การแปรความหมายค่าเฉลี่ยดังนี้ (ประคอง กรรณสูตร. 2542: 74)

4.50 – 5.00	มากที่สุด
3.50 – 4.49	มาก
2.50 – 3.49	ปานกลาง
1.50 – 2.49	น้อย
1.00 – 1.49	น้อยที่สุด

3.6.2 หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (รวีวรรณ ชินะตระกูล. 2538 : 162) ใช้สูตรดังนี้

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum(X - \overline{X})^2}{(N-1)}}$$

เมื่อ $S.D.$ หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

X หมายถึง คะแนนแต่ละจำนวน

$\overline{X}$ หมายถึง ค่าคะแนนเฉลี่ย

$\sum$ คือ ผลรวมของคะแนน

N หมายถึง จำนวนข้อมูลทั้งหมด

3.6.3 การหาประสิทธิภาพของชุดทดลอง (ไชยยศ เรืองสุวรรณ. 2533 : 139)

$$E_1 = \left[\frac{\frac{\sum X}{N}}{A} \right] \times 100$$

$$E_2 = \left[\frac{\frac{\sum Y}{N}}{B} \right] \times 100$$

เมื่อ E_1 คือ ประสิทธิภาพของกระบวนการที่จัดไว้ในชุดการสอน

E_2 คือ ประสิทธิภาพของชุดการสอนในการเปลี่ยนพฤติกรรมของผู้เรียน

ΣX คือ คะแนนรวมของผู้เรียนจากการฝึกปฏิบัติระหว่างการทดลอง

ΣY คือ คะแนนรวมของผู้เรียนจากแบบทดสอบหลังเรียน

A คือ คะแนนเต็มรวมของผู้เรียนจากการปฏิบัติระหว่างการทดลอง

B คือ คะแนนเต็มรวมของผู้เรียนจากแบบทดสอบหลังเรียน

N คือ จำนวนผู้เรียนทั้งหมด

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิจัยเพื่อสร้าง หาคุณภาพและประสิทธิภาพชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งจะต้องมีคุณภาพระดับดีขึ้นไป และผู้วิจัยนำชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส ไปทดลองกับนักศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม แขนงอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ลงทะเบียนเรียนวิชาปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ 2 ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2554 จำนวน 12 คน เพื่อหาประสิทธิภาพตามเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งมีค่าไม่ต่ำกว่า 80/80 โดยวิเคราะห์ด้วยหลักการทางสถิติ และเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลตามลำดับดังนี้

4.1 ผลการสร้างชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสด้านชุดทดลอง

4.2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

4.3 ผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

4.1 ผลการสร้างชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสด้านชุดทดลอง

ผลการพัฒนาชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นประกอบด้วย ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส 4 บอร์ด บรรจุในกล่องที่มีแหล่งจ่ายกำลังไฟตรง กล่องละ 2 บอร์ด โดยแต่ละบอร์ดสามารถถอดสลับกันได้เพื่อทำให้สะดวกในการทดลองและการจัดเก็บ ดังแสดงในภาคผนวก ฉ และมีใบงานทั้งหมด 4 ใบงานแต่ละใบงานมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ชื่อใบงาน วัตถุประสงค์ ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง เครื่องมือและอุปกรณ์ ลำดับการทดลอง การบันทึกผล การคำนวณเปรียบเทียบ คำถามท้ายการทดลอง ตัวอย่างใบงานดังแสดงในภาคผนวก ง สำหรับการทดลองแต่ละใบงานใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง 30 นาที นอกจากนั้นยังจัดทำคู่มือการใช้เพื่อให้ผู้ใช้ศึกษาก่อนใช้ชุดทดลองเพื่อให้เกิดความสะดวกและป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์และวงจร

4.2 การวิเคราะห์คุณภาพชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส ด้านชุดทดลอง

การวิเคราะห์คุณภาพชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสผู้วิจัยได้ดำเนินการโดยให้ผู้ทรงคุณวุฒิเป็นผู้ประเมิน ซึ่งแบ่งเป็น 2 ด้านคือคุณภาพด้านชุดทดลองและคุณภาพด้านเนื้อหาใบงาน ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และระดับคุณภาพด้านชุดทดลองของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	ระดับคุณภาพ
1. ขนาดความเหมาะสมของชุดทดลอง	4.60	0.55	ดีมาก
2. รูปแบบของชุดทดลองก่อให้เกิดแรงจูงใจ	4.40	0.89	ดี
3. ความเหมาะสมของการวางอุปกรณ์	4.40	0.55	ดี
4. ความแข็งแรงทนทานของชุดทดลอง	4.80	0.45	ดีมาก
5. ความเหมาะสมของวัสดุที่นำมาใช้ทำชุดทดลอง	4.60	0.89	ดีมาก
6. ความสะดวกในการดูแลรักษา	4.60	0.55	ดีมาก
7. ความสะดวกในการเตรียมการทดลอง	4.40	0.55	ดี
8. ความเหมาะสมกับระดับผู้เรียน	4.60	0.55	ดีมาก
9. สะดวกและใช้งานง่าย	4.40	0.89	ดี
10.ความสัมพันธ์ของชุดทดลองกับใบงานทดลอง	4.40	0.89	ดี
11.ความปลอดภัยขณะทำการทดลอง	4.40	0.89	ดี
12.คุณค่าของชุดทดลองทางวิชาการโดยภาพรวม	4.40	0.55	ดี
รวม	4.50	0.68	ดีมาก

จากตารางที่ 4.1 คุณภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสด้านชุดทดลอง พบว่ามีคุณภาพอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X}$=4.50) เมื่อพิจารณาแต่ละรายการพบว่า รายการที่มีคุณภาพอยู่ในระดับดีมากมี 5 รายการ เรียงลำดับตามค่าเฉลี่ยได้ดังนี้ ความแข็งแรงทนทานของชุดทดลอง($\bar{X}$=4.80) ขนาดความเหมาะสมของชุดทดลอง ($\bar{X}$=4.60) ความเหมาะสมของวัสดุที่นำมาใช้ทำชุดทดลอง($\bar{X}$=4.60) ความสะดวกในการดูแลรักษา($\bar{X}$=4.60) รายการที่มีคุณภาพอยู่ในระดับดีมี 7 รายการ ดังนี้ รูปแบบของชุดทดลองก่อให้เกิดแรงจูงใจ ($\bar{X}$=4.40) ความเหมาะสมของการวางอุปกรณ์($\bar{X}$=4.40) ความสะดวกในการเตรียมการทดลอง($\bar{X}$=4.40) สะดวกและใช้งานง่าย

($\bar{X}$=4.40) ความสัมพันธ์ของชุดทดลองกับใบงานทดลอง($\bar{X}$=4.40) ความปลอดภัยขณะทำการทดลอง($\bar{X}$=4.40) คุณค่าของชุดทดลองทางวิชาการโดยภาพรวม($\bar{X}$=4.40)

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และและระดับคุณภาพด้านเนื้อหาใบงานของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

รายการประเมิน	*N*	S.D.	ระดับคุณภาพ
1. ความสมบูรณ์ของวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม	4.20	0.45	ดี
2. ความสอดคล้องระหว่างเนื้อหากับวัตถุประสงค์	4.60	0.55	ดีมาก
3. ปริมาณเนื้อหาในแต่ละหน่วย	4.40	0.89	ดี
4. ลำดับขั้นในการนำเสนอเนื้อหา	4.60	0.55	ดีมาก
5. ความถูกต้องของเนื้อหา	4.60	0.89	ดีมาก
6. ความเหมาะสมของเนื้อหากับระดับผู้เรียน	4.40	0.55	ดี
7. ความชัดเจนในการอธิบายเนื้อหา	4.60	0.55	ดีมาก
8. การเรียงลำดับเนื้อหาเหมาะสม	4.80	0.45	ดีมาก
9. ภาษาที่ใช้อ่านเข้าใจง่าย	4.20	0.45	ดี
10. การจัดรูปแบบใบงานเนื้อหาเหมาะสม	4.40	0.55	ดี
11. รูปภาพประกอบเนื้อหาสื่อความหมายได้ชัดเจน	4.40	0.89	ดี
12. รูปภาพประกอบมีขนาดเหมาะสม	4.00	1.00	ดี
รวม	4.43	0.65	ดี

จากตารางที่ 4.2 คุณภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสด้านเนื้อหาใบงาน พบว่ามีคุณภาพอยู่ในระดับดี ($\bar{X}$=4.43) เมื่อพิจารณาแต่ละรายการพบว่า รายการที่มีคุณภาพอยู่ในระดับดีมากมี 5 รายการ เรียงลำดับตามค่าเฉลี่ยได้ดังนี้ ความสอดคล้องระหว่างเนื้อหากับวัตถุประสงค์($\bar{X}$=4.60) ลำดับขั้นในการนำเสนอเนื้อหา($\bar{X}$=4.60) ความถูกต้องของเนื้อหา($\bar{X}$=4.60) ความชัดเจนในการอธิบายเนื้อหา($\bar{X}$=4.60) การเรียงลำดับเนื้อหาเหมาะสม ($\bar{X}$=4.60) รายการที่มีคุณภาพอยู่ในระดับดีมี 7 รายการ ดังนี้ ปริมาณเนื้อหาในแต่ละหน่วย($\bar{X}$=4.40) ความเหมาะสมของเนื้อหากับระดับผู้เรียน($\bar{X}$=4.40) การจัดรูปแบบใบงานเนื้อหาเหมาะสม($\bar{X}$=4.40) รูปภาพประกอบเนื้อหาสื่อความหมายได้ชัดเจน($\bar{X}$=4.40) ภาษาที่ใช้อ่านเข้าใจง่าย($\bar{X}$=4.20) รูปภาพประกอบมีขนาดเหมาะสม($\bar{X}$=4.00)

4.3 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสผู้วิจัยได้วิเคราะห์โดยพิจารณาจากผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนปฏิบัติ ตามเกณฑ์ที่กำหนดมีค่าไม่ต่ำกว่า 80/80 รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

รายการ	จำนวนผู้เรียน	คะแนนเต็ม	คะแนนเฉลี่ยที่ได้	ร้อยละ	เกณฑ์ร้อยละ
คะแนนทดสอบระหว่างการปฏิบัติใบงาน(E_1)	12	150	126.96	84.64	80
คะแนนทดสอบหลังการปฏิบัติใบงาน (E_2)	12	48	39.41	82.10	80

จากตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบระหว่างการปฏิบัติใบงานได้จากคะแนนจากแบบสังเกตพฤติกรรมแต่ละใบงานและแบบทดสอบท้ายใบงานระหว่างการปฏิบัติใบงาน มีคะแนนเต็มทั้งหมด 150 คะแนน ได้คะแนนเฉลี่ย 126.96 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 84.64 (E_1) และผลการทดสอบหลังการปฏิบัติใบงานได้จากคะแนนจากแบบสังเกตพฤติกรรมของใบงานรวมและแบบทดสอบรวมมีคะแนนเต็มทั้งหมด 48 คะแนน ได้คะแนนเฉลี่ย 39.41 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 82.10 (E_2) แสดงว่าชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสมีประสิทธิภาพ เท่ากับ 84.64 / 82.10 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ 80/80 และสอดคล้องตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเพื่อสร้าง หาคุณภาพและประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสวิชาปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ 2 หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม แขนงอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อสร้างชุดชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสที่มีคุณภาพ
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

5.1.2 สมมติฐานของการวิจัย

5.1.2.1 ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสที่สร้างขึ้นมีคุณภาพอยู่ในระดับดีขึ้นไป $(\overline{X} \geq 3.5)$

5.1.2.2 ชุดชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ 80/80 (E_1 / E_2)

5.1.3 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

5.1.3.1 ประชากรที่ใช้ในการวิจัย เป็นนักศึกษาหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ครุศาสตร์วิศวกรรม) แขนงอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม ที่ลงทะเบียนเรียนวิชาการปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ในการศึกษา 2554 จำนวน 20 คน

5.1.3.2 กลุ่มตัวอย่างในการวิจัย เป็นนักศึกษาหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ครุศาสตร์วิศวกรรม) แขนงอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จำนวน 12 คน คัดเลือกโดยวิธีการสุ่มแบบเจาะจง

5.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้คือ

5.1.4.1 ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นประกอบด้วยบอร์ดวงจรดังนี้

1. คุณสมบัติของซีมอส
2. แหล่งจ่ายกระแสและวงจรสะท้อนกระแส

3. ตัวขยายความแตกต่าง

4. วงจรออปแอมป์สองภาคเบื้องต้น

5.1.4.2 ใบงานทดลอง สร้างขึ้นเพื่อกำหนดขั้นตอนการปฏิบัติงานและสั่งงานให้นักศึกษาปฏิบัติการทดลอง และสรุปผลการทดลอง อย่างเป็นลำดับโดยใบงานทดลองมีองค์ประกอบดังนี้

1. หัวข้อใบงานทดลอง

2. วัตถุประสงค์ใบงานทดลอง

3. เนื้อหาทฤษฎี

4. เครื่องมือและอุปกรณ์

5. ลำดับขั้นการทดลอง

6. แบบฝึกหัดท้ายใบงานทดลอง

5.1.4.3 แบบทดสอบท้ายใบงาน และแบบทดสอบรวม เป็นแบบทดสอบปรนัย 5 ตัวเลือก โดยมีความเที่ยงตรงทางด้านเนื้อหากับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมมีค่า ICO อยู่ระหว่าง 0.60 – 1.00

5.1.4.4 แบบประเมินคุณภาพชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส ซึ่งแบ่งเป็น 2 ด้านคือแบบประเมินคุณภาพด้านชุดทดลองและด้านเนื้อหาใบงาน

5.1.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการทดลองกับกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งเป็นนักศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม แขนงอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ลงทะเบียนเรียนวิชาปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ 2 ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2554 จำนวน 12 คน โดยมีการดำเนินการดังนี้

5.1.5.1 ปรึกษากับอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ เนื่องจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์เป็นผู้สอนในรายวิชาปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ 2 เพื่อนัดหมายกลุ่มตัวอย่างในการวิจัย ซึ่งเป็นนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม แขนงอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จำนวน 12 คน

5.1.5.2 แนะนำชุดทดลองและใบงานทดลองแก่นักศึกษากลุ่มตัวอย่างทั้งหมดก่อน โดยแจ้งให้ทราบถึงขอบข่ายการใช้งาน หลักการทำงานในการทำงาน ส่วนประกอบที่เกี่ยวข้อง วิธีการปฏิบัติก่อนการทดลอง และอธิบายทฤษฎีพร้อมคำแนะนำในการทดลอง ก่อนลงมือทำการทดลอง

5.1.5.3 การเก็บข้อมูล โดยการวิจัยครั้งนี้ได้เก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างที่ปฏิบัติตามใบงานทั้ง 4 ใบงานทดลอง ดังนี้

ใบงานทดลองที่ 1คุณสมบัติของซีมอส

ใบงานทดลองที่ 2 แหล่งจ่ายกระแสและวงจรสะท้อนกระแส

ใบงานทดลองที่ 3 ตัวขยายความแตกต่าง

ใบงานทดลองที่ 4 วงจรออปแอมป์สองภาค

5.1.5.4 นำคะแนนที่ได้จากการสังเกตพฤติกรรมกับคะแนนที่ผู้เรียนได้จากการทำแบบทดสอบที่ได้ระหว่างการทดลองมาหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน และหลังจากทดลองครบทั้ง 4 ใบงานทดลองแล้ว ทำการทดสอบโดยทดลองใบงานรวมและให้นักศึกษาแต่ละคนทำแบบทดสอบรวมแล้วนำข้อมูลที่ได้มาหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษารวมทุกเรื่อง นำคะแนนที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพหรือ E_1 / E_2

5.1.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูลตามหลักการทางสถิติ โดยมีประเด็นในการวิเคราะห์ดังนี้

5.1.6.1 วิเคราะห์คุณภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสด้านเนื้อหาใบงานและด้านชุดทดลอง

5.1.6.2 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสโดยวิเคราะห์จากคะแนนที่ได้จากแบบสังเกตพฤติกรรมรวมกับแบบทดสอบท้ายใบงาน แต่ละใบงานและคะแนนที่ได้จากแบบสังเกตพฤติกรรมของใบงานรวมกับแบบทดสอบรวมโดยใช้สูตร E_1 / E_2

5.1.7 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังกล่าว สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.7.1 ทำการวิจัยเรื่องชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสวิชาปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ 2 หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรมแขนงอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

5.1.7.2 คุณภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสโดยผู้ทรงคุณวุฒิประเมินคุณภาพด้านชุดทดลองอยู่ในระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.50 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.68

5.1.7.3 คุณภาพของชุดชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสโดยผู้ทรงคุณวุฒิประเมินคุณภาพด้านเนื้อหาใบงานที่สร้างขึ้นอยู่ในระดับดี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.43 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.65

5.1.7.4 ประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสโดยทดลองกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 12 คน ผลการวิจัยพบว่าชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสที่สร้างขึ้น มีประสิทธิภาพ E_1 / E_2 เท่ากับ 84.64 / 82.10 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดและเป็นไปตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ชุดทดลองที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพ 84.64 / 82.10 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด 80/80 สอดคล้องกับสมมุติฐานของงานวิจัยที่ตั้งไว้ เนื่องมาจาก

5.2.1 นักศึกษามีความตั้งใจทดลองเป็นอย่างดี อาจเป็นเพราะชุดทดลองที่สร้างขึ้น มีการวางแผนจัดทำอย่างเป็นขั้นตอน มีการวิเคราะห์หลักสูตรรายวิชาเป็นอย่างดี อุปกรณ์ที่ทดลองใช้งานมีความสะดวกในการใช้งาน นักศึกษาสามารถทราบผลการทดลองของตนเองในแต่ละใบงานทดลองได้อย่างชัดเจนส่งผลให้นักศึกษามีความสนใจต่อการทดลองมากขึ้น

5.2.2 ผลการวิจัยในครั้งนี้คะแนนเฉลี่ยจากการปฏิบัติการทดลองใบงานทั้ง 4 ใบงานสูงกว่าคะแนนเฉลี่ยจากใบงานรวม คือ 84.64 / 82.10 ตามลำดับอาจเป็นเพราะใบงานรวม เป็นการรวมใบงานทดลองทั้ง 4 เรื่อง ต้องใช้ทักษะความรู้มากขึ้น ซึ่งผลการวิจัยสอดคล้องกับวิทยานิพนธ์(ณัฏฐพงศ์ ศิโรโรจน์. 2552 : 122) ผลของคะแนนการทดสอบของกลุ่มตัวอย่างเพื่อหาประสิทธิภาพของ ชุดทดลองวงจรไฟฟ้ากระแสสลับได้นำคะแนนมาคิดเป็นร้อยละ ได้ 83.20/81.66 และนักศึกษากลุ่มทดลอง มีพฤติกรรมในการทดลองที่ดี

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

จากผลการวิจัยชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.3.1.1 การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง ดังนั้นก่อนทำการทดลองควรมีการสาธิต อธิบายถึงวิธีการใช้งานเกี่ยวกับชุดทดลองและเครื่องมือต่างๆ รวมถึงข้อควรระวังต่างๆ เพื่อให้นักศึกษามีความรู้ก่อนการลงมือปฏิบัติ ซึ่งจะทำให้ผู้เรียนมีความเข้าใจ ปฏิบัติได้อย่างถูกต้อง และเกิดการเรียนรู้ด้วยตัวเองได้เร็วขึ้น

5.3.1.2 ในระหว่างการทดลอง ผู้สอนต้องดูแลผู้เรียนอย่างใกล้ชิด เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง รวมถึงการสังเกตพฤติกรรมของผู้เรียนเพื่อให้การทดลองบรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ได้ตั้งไว้ ซึ่งจะทำให้ผู้เรียนมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนที่ดียิ่งขึ้นไป

5.3.1.3 ควรทำการศึกษารูปแบบของชุดทดลองในเชิงพาณิชย์ หลายๆ ตัวอย่างเพื่อนำเทคนิคและวิธีการวางอุปกรณ์และการเลือกใช้วัสดุมาใช้ในการสร้างชุดทดลอง

5.3.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

5.3.2.1 เนื่องจากการวิจัยในครั้งนี้ นำไปใช้ทดลองกับกลุ่มตัวอย่าง วิชาปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ 2 หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม แขนงอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเพียงแขนงเดียว ดังนั้นจึงควรมีการนำชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสที่สร้างขึ้นไปทดลองกับแขนงอื่นที่มีเนื้อหารายวิชาในลักษณะเดียวกัน เพื่อให้การวิจัยมีขอบเขตกว้างขึ้น

5.3.2.2 ควรมีการวิจัยเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพของผู้เรียนระหว่างการใช้ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสกับผู้เรียนที่ใช้โปรแกรมจำลองการทำงาน ว่ามีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนแตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร

บรรณานุกรม

กระทรวงศึกษาธิการ, สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา. 2546. หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2546. กรุงเทพฯ : กระทรวงศึกษาธิการ.

กานดา พูนลาภทวี. 2528. **การวัดผลและประเมินผลการศึกษา.** ภาควิชาครุศาสตร์เทคโนโลยี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

กิติพงค์ มะโน. 2552. **เอกสารประกอบการเรียนการสอน วิชา Integrated Circuit Analysis and Design.** คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

กิติพงค์ มะโน. 2552. **วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม1.** กรุงเทพฯ : คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

การทดลองที่ EL322 CMOS OpAmp ม.ป.ป. ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

คเชนท์ ขาวงาม. 2550. “การออกแบบวงจรความต้านทานชนิดลอยตัวที่ควบคุมด้วยค่าศักดาเชิงเส้นกว้างที่มีการชดเชยผลจากอุณหภูมิ โดยใช้เทคโนโลยีซีมอส.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ชมัยพร พจนสุวรรณชัย. 2547. “การออกแบบวงจรหาค่าสูงสุดและวงจรค่าต่ำสุดชนิดหลายอินพุตโดยใช้เทคโนโลยีทรานซิสเตอร์แบบซีมอส.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ชัชวาล มูลศรี. 2540. “การพัฒนาชุดประลองสำหรับการสอนภาคปฏิบัติแบบการจำลองเรื่องวงจรทรานซิสเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Pspice Version 6.1 for Windows 3.11.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ชุมชล จิตรนำทรัพย์. 2545. “การออกแบบวงจรออปแอมป์แรงดันต่ำโดยใช้ซีมอส.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ไชยยศ เรืองสุวรรณ. 2533. **เทคโนโลยีการศึกษา ทฤษฎีและการวิจัย.** กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.

เตือนใจ อาชีวะพนิช. 2542.“การสร้างและหาประสิทธิภาพชุดการสอนวิชาการวิเคราะห์วงจรข่ายหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต.” วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาไฟฟ้า ภาควิชาคุรุศาสตร์ไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ณัฏฐพงศ์ ศิโรโรจน์. 2552. “การหาประสิทธิภาพชุดทดลองวงจรไฟฟ้ากระแสสลับหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต.” วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธนันต์ ศรีสกุล. 2552. **พื้นฐานการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์**. กรุงเทพฯ : วิตตี้กรุ๊ป.

พะยอม วงศ์สารศรี, วรรณวิภา จัตุชัย และอรทัย ทองอยู่. 2549. **สำนักวิจัย**. กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต.

พวงรัตน์ ทวีรัตน์. 2535. **วิธีการวิจัยทางพฤติกรรมศาสตร์และสังคมศาสตร์**. กรุงเทพฯ : สำนักทดสอบทางการศึกษาและจิตวิทยา มหาวิทยาลัยศรีนครินทวิโรฒ.

พูลทรัพย์ นาคนาคา.2552. **เอกสารประกอบการเรียนการสอน วิชาการวิจัยทางการศึกษา.** คณะครุศาสตร์ : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต.

พิสิฐ เมธาภัทร และธีรพล เมธีกุล. 2539. **ยุทธวิธีการสอนวิชาเทคนิค**. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ยุทธพิชัย กล้าหาญ.2546. “การสร้างและหาประสิทธิภาพชุดปฏิบัติการวงจรกรองความถี่ วิชาออป-แอมป์และไอซี หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พ.ศ. 2546.” วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ยืน ภู่วรรณ.2534. **หลักการและแนวทางการจัดหาครุภัณฑ์ทางการศึกษาในสาขางานวิศวกรรม.** กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รวีวรรณ ชินะตระกูล. 2538. **วิธีวิจัยการศึกษา**. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วรรณวิภา จัตุชัย, อารมณ์ อุตภาพ, จรูญ เฉลิมทอง, สุกฤษฎิ์ วงแวงน้อย และจิราพร รอดพ่วง. 2552. **เอกสารประกอบการเรียนการสอน วิชาการวัดผลและประเมินผลทางการศึกษา.** คณะครุศาสตร์ : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต.

วัลลภ จันทร์ตระกูล. 2552. การออกแบบสร้างและประเมินประสิทธิภาพชุดการสอน : ทำอย่างไรให้เป็นตรรกะ (Logic). **วารสารพัฒนาเทคนิคศึกษา.** 21 (71), 24-32.

วีรพงษ์ พฤกษชาติ. 2548. “การปฏิบัติการ วิชาการวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยโปรแกรมพีสไปซ์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ล้วน สายยศ และอังคณา สายยศ. 2543. **เทคนิคการวัดผลการเรียนรู้.** กรุงเทพฯ : สุวีริยาสาส์น.

เลิศศักดิ์ ยุทธสุขประเสริฐ. 2549. “การออกแบบวงจรควบคุมความต้านทานชนิดต่อลงดินด้วยเทคโนโลยีซีมอส โดยมีการชดเชยอุณหภูมิด้วย.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ศักดิ์ศรี แก่นสม. 2545. **ชุดทดลองเชื่อมโยงทางฮาร์ดแวร์ของเครื่องโปรเซสเซอร์ Z-80.** สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

สมปอง มากแจ้ง. 2543. **เทคโนโลยีการศึกษา.** กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

สมเจตน์ ม่วงเกษม. 2540. "การสร้างและหาประสิทธิภาพชุดการสอนวิชาอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง." วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาไฟฟ้า ภาควิชาคุรุศาสตร์ไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

สุชาติ หัตถ์สุวรรณ. 2547. "การสร้างและหาประสิทธิภาพชุดทดลองวิชาการออกแบบวงจรพัลส์และสวิตชิ่ง หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สถาบันราชภัฏธนบุรี." วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร บัณฑิตวิทยาลัย: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สุราษฎร์ พรหมจันทร์. 2530. **การวัดผลการศึกษา.** ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

อภิรักษ์ เสือเดช. 2551. "วงจรป้อนกลับโหมดร่วมที่มีช่วงปฏิบัติงานกว้างแบบซีมอสและการประยุกต์ใช้งาน." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

R. L. Geiger and E. and Sánchez-Sinencio. 1985. "Active Filter Design Using Operational Transconductance Amplifiers: A Tutorial." IEEE Circuits and Devices Magazine.

Marston, R.M. 1993. **Op-amp circuits manual: including OTA circuits.** Oxford : Butterworth-Heinemann.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก หนังสือราชการประกอบการดำเนินการวิจัย

ภาคผนวก ข รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ

ภาคผนวก ค แบบประเมินคุณภาพ

ภาคผนวก ง ตัวอย่างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ภาคผนวก ฉ คู่มือการใช้ชุดทดลองวงรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอสเบื้องต้น

ภาคผนวก ก

หนังสือราชการประกอบการดำเนินการวิจัย

บันทึกข้อความ

หน่วยงาน คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม งานบริการทางวิชาการ โทร 3720

ที่ ศธ 0524.04(1.9)/155 วันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2555

เรื่อง รับรองผลการพิจารณาบทความเพื่อนำเสนอในการประชุมวิชาการทางการศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 2

เรียน คุณชาคริต โพธิ์บัว

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง **"ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอสเบื้องต้น"** เพื่อนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 2 "การพัฒนาประสบการณ์การเรียนรู้ในชีวิตจริง : การศึกษาเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนไปสู่ประชาคมอาเซียน" ทางคณะกรรมการฝ่ายวิชาการ และผู้ทรงคุณวุฒิ ได้พิจารณาแล้วว่าบทความของท่านสามารถนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 2 ในวันศุกร์ที่ 11 พฤษภาคม 2555 ณ. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

(รศ.พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์)

คณบดีคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

คำสั่งคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ที่ 549 / 2554

เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คณะกรรมการพิจารณาหัวข้อและเค้าโครงวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบสำรอง ของ นายชาคริต โพธิ์บัว

เพื่อให้การเรียบเรียงวิทยานิพนธ์ ของ นายชาคริต โพธิ์บัว รหัสประจำตัว 50064301 หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ เป็นไปด้วยความเรียบร้อยและประสิทธิภาพจึงแต่งตั้งคณะกรรมการเพื่อปรึกษาและพิจารณาหัวข้อและเค้าโครงวิทยานิพนธ์ ดังต่อไปนี้

1. **คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์**

รศ.กิติพงค์	มะโน	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
รศ.ดร.วิสุทธิ์	สุนทรกนกพงศ์	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

2. **คณะกรรมการพิจารณาหัวข้อและเค้าโครงวิทยานิพนธ์**

รศ.พีระวุฒิ	สุวรรณจันทร์	ประธานกรรมการ	
รศ.กิติพงค์	มะโน	กรรมการ	
รศ.ดร.วิสุทธิ์	สุนทรกนกพงศ์	กรรมการ	
ดร.สมชาย	หมื่นสายญาติ	กรรมการ	
รศ.ดร.กัลยาณี	จิตต์การุณย์	กรรมการ	(กรรมการภายนอก)

3. **คณะกรรมการสอบสำรอง**

นอ.ดร.วีระชัย	เชาว์กำเนิด	กรรมการ	(อาจารย์บัณฑิตพิเศษ)
ผศ.ดร.ธีระพล	เทพหัสดิน ณ อยุธยา	กรรมการ	(อาจารย์บัณฑิตประจำ)

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

สั่ง ณ วันที่ 17 พฤศจิกายน พ.ศ. 2554

(รองศาสตราจารย์ พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์)
คณบดี

ประกาศคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง ผลการพิจารณาหัวข้อและเค้าโครงวิทยานิพนธ์

.....

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม โดยความเห็นชอบของคณะกรรมการพิจารณาหัวข้อและเค้าโครงวิทยานิพนธ์ ขอประกาศรายชื่อหัวข้อและเค้าโครงวิทยานิพนธ์ หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้รับอนุมัติเมื่อ วันที่ 16 มกราคม 2555 ให้ดำเนินการดังนี้

นายชาคริต โพธิ์บัว รหัสนักศึกษา 50064301 ให้ทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง "ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอสเบื้องต้น (Basic Analog CMOS Integated Circuit Laboratory Set)" โดยมี รศ.กิติพงค์ มะโน เป็นอาจารย์ที่ปรึกวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.วิสุทธิ์ สุนทรกนกพงศ์ เป็นอาจารย์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ทั้งนี้ให้นักศึกษาค้นคว้าและเขียนวิทยานิพนธ์ โดยปรึกษากับอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสิ้นภายในเวลาที่กำหนดในระเบียบของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประกาศ ณ วันที่ 19 มกราคม พ.ศ. 2555

(รองศาสตราจารย์พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์)
คณบดี

บันทึกข้อความ

หน่วยงาน คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล. ส่วนสนับสนุนวิชาการ โทร.3692
ที่ ศธ 0524.04 / **1620** **วันที่** 23 เมษายน 2555

เรื่อง ขอเชิญเป็นผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและประเมินแบบประเมินคุณภาพชุดทดลองฯ เพื่อการวิจัย

เรียน ผศ.พิชญ์สินี มะโน / ผศ.สุชิน อาจหาญ / ดร.สมชาย หมื่นสายญาติ /
อาจารย์นรินทร์ ธรรมารักษ์วัฒนะ

ด้วย นายชาคริต โพธิ์บัว นักศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กำลังทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอสเบื้องต้น” โดยมี รศ.กิติพงศ์ มะโน เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรศ.วิสุทธิ์ สุนทรกนกพงศ์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม พิจารณาแล้วเห็นว่าท่านเป็นผู้มีความรู้ความสามารถเกี่ยวกับเรื่องดังกล่าวเป็นอย่างดี จึงขอเชิญท่านเป็นผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและประเมินแบบประเมินคุณภาพชุดทดลอง ฯ นี้ว่ามีความถูกต้องและเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ซึ่งผลการตรวจและประเมินแบบประเมินของท่านจะช่วยให้งานวิจัยของ นายชาคริต โพธิ์บัว มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น พร้อมกันนี้ได้แนบแบบสอบถามเพื่อการวิจัย

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาและหวังว่าจะได้รับความอนุเคราะห์จากท่านด้วยดีและขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งมา ณ โอกาสนี้ด้วย

(รองศาสตราจารย์วิสุทธิ์ สุนทรกนกพงศ์)
รองคณบดีกำกับดูแลงานด้านวิชาการและบัณฑิตศึกษา
ปฏิบัติการแทนคณบดี

ที่ ศธ 0524.04/ 1620

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพฯ 10520

23 เมษายน 2555

เรื่อง ขอเชิญเป็นผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและประเมินแบบประเมินคุณภาพชุดทดลองฯ เพื่อการวิจัย

เรียน ดร.ไพบูลย์ พวงวงศ์ตระกูล

สิ่งที่ส่งมาด้วย แบบประเมินคุณภาพของชุดทดลอง ฯ เพื่อการวิจัย

ด้วย นายชาคริต โพธิ์บัว นักศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กำลังทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอสเบื้องต้น” โดยมี รศ.กิติพงศ์ มะโน เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรศ.วิสุทธิ์ สุนทรกนกพงศ์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม พิจารณาแล้วเห็นว่าท่านเป็นผู้มีความรู้ความสามารถเกี่ยวกับเรื่องดังกล่าวเป็นอย่างดี จึงขอเชิญท่านเป็นผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและประเมินแบบประเมินคุณภาพชุดทดลอง ฯ นี้ว่ามีความถูกต้องและเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ซึ่งผลการตรวจและประเมินแบบประเมินของท่านจะช่วยให้งานวิจัยของ นายชาคริต โพธิ์บัว มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาและหวังว่าจะได้รับความอนุเคราะห์จากท่านด้วยดีและขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์)
คณบดี

ส่วนสนับสนุนวิชาการ
โทร. 02-329-8000 ต่อ 3692
โทรสาร. 02- 329-8436
ติดต่อนักศึกษา โทร. 083-614-4469

ภาคผนวก ข

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ

1. ดร.ไพบูลย์ พวงวงศ์ตระกูล อาจารย์ประจำสาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ผศ.พิชญ์สินี มะโน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. ผศ.สุชิน อาจหาญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4. ดร.สมชาย หมื่นสายญาติ อาจารย์ประจำสาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
5. อาจารย์นรินทร์ ธรรมารักษ์วัฒนะ ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภาคผนวก ค

แบบประเมินคุณภาพ

แบบประเมินคุณภาพชุดทดลองวงจรแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสโดยผู้ทรงคุณวุฒิ

คำชี้แจง

แบบประเมินคุณภาพชุดทดลองวงจรแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสโดยผู้ทรงคุณวุฒินี้ผู้วิจัยได้จัดทำขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบความคิดเห็น และข้อเสนอแนะเกี่ยวกับชุดทดลองวงจรแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส ซึ่งจะใช้เป็นชุดปฏิบัติการและอุปกรณ์ประกอบการเรียนการสอนในวิชาการปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ รหัสวิชา 03376030 สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นายชาคริต โพธิ์บัว

ผู้วิจัย

ข้อแนะนำในการตอบแบบประเมิน

1. อ่านคำแนะนำในการตอบแบบประเมินอย่างละเอียด
2. ให้ท่านทำเครื่องหมาย ✓ ลงในช่องระดับคุณภาพเพียงข้อเดียว ที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน โดยได้มีการกำหนดเกณฑ์การเลือกไว้ 5 ระดับ ดังนี้

   ระดับ 5 หมายถึง ระดับคุณภาพดีมาก

   ระดับ 4 หมายถึง ระดับคุณภาพดี

   ระดับ 3 หมายถึง ระดับคุณภาพปานกลาง

   ระดับ 2 หมายถึง ระดับคุณภาพพอใช้

   ระดับ 1 หมายถึง ระดับคุณภาพต้องปรับปรุง

แบบประเมินคุณภาพชุดทดลองวงจรแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสโดยผู้ทรงคุณวุฒิ

ข้อที่	รายการประเมินด้านเนื้อหา	ระดับคุณภาพ				
		5	4	3	2	1
1	ความสมบูรณ์ของวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม					
2	ความสอดคล้องระหว่างเนื้อหากับวัตถุประสงค์					
3	ปริมาณเนื้อหาในแต่ละหน่วย					
4	ลำดับขั้นในการนำเสนอเนื้อหา					
5	ความถูกต้องของเนื้อหา					
6	ความเหมาะสมของเนื้อหากับระดับผู้เรียน					
7	ความชัดเจนในการอธิบายเนื้อหา					
8	การเรียงลำดับเนื้อหาเหมาะสม					
9	ภาษาที่ใช้อ่านเข้าใจง่าย					
10	การจัดรูปแบบใบงานเนื้อหาเหมาะสม					
11	รูปภาพประกอบเนื้อหาสื่อความหมายได้ชัดเจน					
12	รูปภาพประกอบมีขนาดเหมาะสม					

ข้อที่	รายการประเมินด้านแบบฝึกหัด	ระดับคุณภาพ				
		5	4	3	2	1
1	คำถามตรงตามวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม					
2	แบบทดสอบคลอบคลุมวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม					
3	ข้อความกระชับเหมาะสม					
4	ภาษาที่ใช้เข้าใจง่าย					
5	จำนวนข้อเหมาะสมกับวัตถุประสงค์					
6	คำถามและตัวเลือกมีเป้าหมายชัดเจน					
7	คำถามมีความยากง่ายเหมาะสม					
8	คำถามมีความกระชับเหมาะสม					

แบบประเมินคุณภาพชุดทดลองวงจรแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอสโดยผู้ทรงคุณวุฒิ

ข้อที่	รายการประเมินด้านเนื้อหา	ระดับคุณภาพ				
		5	4	3	2	1
1	ความสมบูรณ์ของวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม					
2	ความสอดคล้องระหว่างเนื้อหากับวัตถุประสงค์					
3	ปริมาณเนื้อหาในแต่ละหน่วย					
4	ลำดับขั้นในการนำเสนอเนื้อหา					
5	ความถูกต้องของเนื้อหา					
6	ความเหมาะสมของเนื้อหากับระดับผู้เรียน					
7	ความชัดเจนในการอธิบายเนื้อหา					
8	การเรียงลำดับเนื้อหาเหมาะสม					
9	ภาษาที่ใช้อ่านเข้าใจง่าย					
10	การจัดรูปแบบใบงานเนื้อหาเหมาะสม					
11	รูปภาพประกอบเนื้อหาสื่อความหมายได้ชัดเจน					
12	รูปภาพประกอบมีขนาดเหมาะสม					

ข้อที่	รายการประเมินด้านแบบฝึกหัด	ระดับคุณภาพ				
		5	4	3	2	1
1	คำถามตรงตามวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม					
2	แบบทดสอบคลอบคลุมวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม					
3	ข้อความกระชับเหมาะสม					
4	ภาษาที่ใช้เข้าใจง่าย					
5	จำนวนข้อเหมาะสมกับวัตถุประสงค์					
6	คำถามและตัวเลือกมีเป้าหมายชัดเจน					
7	คำถามมีความยากง่ายเหมาะสม					
8	คำถามมีความกระชับเหมาะสม					

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

<u>วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม</u>

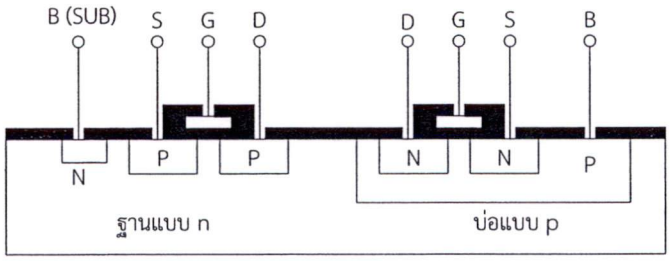
1. นักศึกษาสามารถอธิบายโครงสร้างภายในของซีมอสได้
2. นักศึกษาสามารถวัดและหาค่า k และ V_t ของซีมอสได้
3. นักศึกษาสามารถวัดและหาค่าระยะสัมพัทธ์ (λ) ของวงจรซีมอสได้

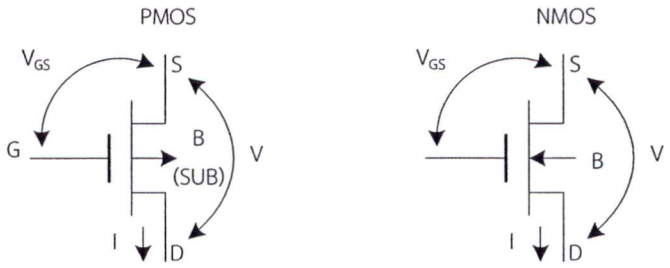
<u>ทฤษฎี</u>

มอสเฟต (MOSFET) เป็นชื่อย่อมาจาก Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor เป็นทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่งที่ทำงานโดยอาศัยผลของสนามไฟฟ้า โดยมีข้อได้เปรียบกว่าทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์โดยรวมได้ คือ มอสเฟตจะมีความต้านทานอินพุตสูงกว่าไบโพลาร์ มีสัญญาณรบกวนต่ำ มีรูปลักษณ์ของวงจรง่ายกว่า และข้อได้เปรียบทางโครงสร้าง ทำให้มอสเฟตใช้พื้นที่ในการสร้างน้อย และมีขบวนการสร้างที่ซับซ้อนน้อยกว่าไบโพลาร์ ดังนั้น เมื่อนำมาสร้างเป็นวงจรรวมแล้ว จะได้ขนาดของ ชิป (chip) ที่มีขนาดเล็กประหยัดพลังงาน โดยมอสเฟตมีโครงสร้างหลักประกอบด้วยโลหะ ออกไซด์ และสารกึ่งตัวนำ และเป็นอุปกรณ์ใช้งานพื้นฐาน ชนิดหนึ่งมี 4 ขา ได้แก่ เกท (G:Gate) เดรน (D:Drain) ซอส (S:Sorce) และ บอดี(B:Body) หรือ ฐานรอง (Substrate) ที่ทำงานโดยการควบคุมการไหลของกระแสทางเอาต์พุตด้วยสนามหรือแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตและสามารถแบ่งมอสเฟตตามโครงสร้างได้ 2 แบบ คือมอสเชนแนลเอ็น (n channel MOS)หรือเรียกสั้นๆว่า เอ็นมอส (nMOS) และมอสเชนแนลพี(p channel MOS) เรียกสั้นๆว่า พีมอส (pMOS) ดังโครงสร้างในรูปที่ 1 ก และ ข ตามลำดับ การทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ nMOS อาศัยหลักการเหนี่ยวนำประจุลบให้เกิดขึ้นเพื่อเป็นช่องผ่านของพาหะเรียกว่าเชนแนล (Channel) ในทางกลับกันทรานซิสเตอร์แบบ pMOS จะใช้การเหนี่ยวนำประจุบวก ดังนั้นเมื่อให้แรงดันที่เกทเปลี่ยนแปลง จะทำให้ความเป็นตัวนำระหว่างเดรนกับซอสเปลี่ยนแปลงไปด้วย ส่งผลให้กระแสเดรนเปลี่ยนแปลง จึงมักกล่าวว่ามอสเฟตเป็นอุปกรณ์ควบคุมกระแสด้วยแรงดัน โดยที่แรงดัน V_{GS} หมายถึง ศักดาไฟฟ้าที่เกทอ้างอิงกับซอส ส่วน V_{DS} หมายถึงศักดาไฟฟ้าที่เดรนอ้างอิงกับซอส และ I_{DS} หมายถึง กระแสที่ไหลระหว่างเดรนกับซอสสำหรับขาบอดี (Body) หรือฐานรอง (Substrate) เป็นขาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage)

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

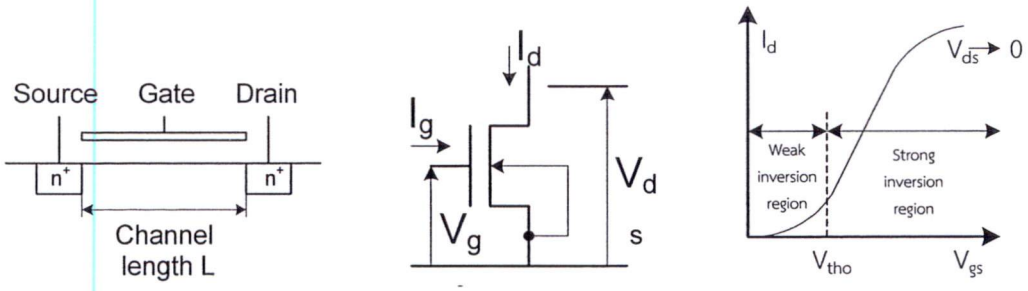
หรือแรงดันที่เกทเทียบกับซอสต่ำสุดที่ทำให้มีกระแสไหลระหว่างเดรนกับซอส V_{th} โดยเป็นการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวเท่านั้น แต่ในการใช้งานโดยทั่วไปเรามักจะลัดวงจรขาซอสกับฐานรอง





รูปที่ 1.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ nMOS และ pMOS

การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ MOSFET เป็นอุปกรณ์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เช่น PSpice จะต้องกำหนดโมเดลของ MOSFET ป้อนให้กับโปรแกรม ตัวอย่างการกำหนดโมเดลในที่นี้จะพิจารณา nMOS แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ตามคุณสมบัติแสดงในรูปที่ 1.2



ก. ข. ค.

รูปที่ 1.2 n MOSFET แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ สำหรับการสร้างโมเดล

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

สมมุติว่าซอสกับบอดีต่อเข้าด้วยกัน จะมีเพียงแต่แรงดันหรือสนามไฟฟ้าที่เกทค่อยๆ เหนี่ยวนำประจุบนบอดีเพื่อสร้างช่องนำพาหะไฟฟ้า จนกระทั้งเมื่อแรงดันสูงเพียงพอที่ทำให้มีกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่านจากเดรนไปยังซอส สังเกทเห็นว่าที่แรงดันเกทต่ำๆ ($V_{GS} < V_{THO}$) จะมีกระแสจำนวนน้อยๆไหลผ่าน (Weak inversion region) ลักษณะนี้จะคล้ายกับทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ npn โดยซอสเสมือนอิมิเตอร์ เดรนเสมือนคอลเลคเตอร์และบอดีที่ถูกเหนี่ยวนำเป็น ช่องยาว L เป็นเบส อย่างไรก็ดีเมื่อนำมาใช้งานราจะพิจารณาคุณสมบัติในช่วงต่อจากแรงดัน เทรชโฮล (Strong inversion region) ซึ่งจะมีกระแสเดรนจำนวนมากไหลโดยมีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

ก. สมการกระแสของ MOSFET

ถ้ากำหนด I_{ds} เป็นกระแสที่ไหลจากเดรนไปยังซอสผ่านแชนแนลยาว L ดังนั้น

$$I_{ds} = \frac{Q}{t} \tag{1.1}$$

เมื่อ Q = ประจุที่เหนี่ยวนำในแชนแนล

t = เวลาที่ประจุใช้วิ่งผ่านแชนแนล

โดยที่

$$\tau = \frac{L}{\mu E} \tag{1.2}$$

เมื่อ L = ระยะทาง

μE = ความเร็วอิเล็กตรอน

μ คือค่า mobility ของพาหะนำประจุ (Charge Carrier) ภายใต้สนามไฟฟ้า E มีหน่วยเป็น m^2N.Sec ถ้า V_{ds} มีค่าต่ำ ๆ จะประมาณได้ค่า

$$E = \frac{V_{ds}}{L} \tag{1.3}$$

ดังนั้น

$$\tau = \frac{L^2}{\mu V_{ds}} \tag{1.4}$$

ถ้า Q = จำนวนประจุลบที่วิ่งผ่านแชนแนล

= - ค่าคาพาซิแต็นซ์ของเกท x แรงดันคล่อมแผ่นตัวนำคู่ขนาน

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

$$= -C_g(V_{GS} - V_{THO} - \frac{V_{ds}}{2}) \quad (1.5)$$

เทอม $V_{ds}/2$ มาจากการพิจารณาว่าสนามไฟฟ้าตลอดความยาวของแชนแนลจะเกิดขึ้นเมื่อ แรงดันเฉลี่ยของแชนแนลเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันเดรน ซอส คือ $V_{ds}/2$

เนื่องจาก A คือค่าคาปาซิแตนซ์ของแผ่นตัวนำคู่ขนานที่มีพื้นที่ A และมีสารฉนวนความหนา D คั้นกลางอยู่โดยคือ ค่าคงที่ไดอิเลคตริก (Dieletric constant) ของสารฉนวน

ดังนั้น

$$Q = -\frac{\varepsilon A}{D}(V_{GS} - V_{THO} - \frac{V_{ds}}{2}) \quad (1.6)$$

เนื่องจาก A = กว้าง x ยาว = WL ดังนั้น

$$Q = -\frac{\varepsilon WL}{D}(V_{GS} - V_{THO} - \frac{V_{ds}}{2}) \quad (1.7)$$

จากสมการ (1-1), (1-3) และ (1-7) จะได้ว่า

$$I_{ds} = -I_{ds} = \frac{Q}{\tau} = -\frac{\mu\varepsilon W}{LD}[(V_{GS} - V_{THO})V_{ds} - \frac{1}{2}V_{ds}^2] \quad (1.8)$$

ข. สมการกระแสเมื่อ MOSFET อยู่ในช่วงไม่อิ่มตัว (Non Saturation region)

ถ้า V_{ds} มีค่าต่ำๆ จะตัดเทอม $V_{ds}/2$ ทิ้ง โดยพิจารณาว่า $V_{ds} < (V_{GS} - V_{THO})$

$$I_{ds} = \frac{\mu\varepsilon W}{LD}(V_{GS} - V_{THO})V_{ds} \quad (1.9)$$

หรือ

$$V_{ds} = \frac{LD}{\mu\varepsilon W(V_{GS} - V_{THO})}I_{ds} \quad (1.10)$$

เนื่องจากค่า μ, ε, W, L และ D มีค่าคงที่ ดังนั้นที่แรงดันไบอัส $(V_{GS} - V_{THO})$ ค่าหนึ่ง จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นของแรงดันและกระแส V_{ds} = ค่าคงที่ x I_{ds}

จากสมการนี้จึงสรุปได้ว่าถ้า V_{ds} มีค่าน้อย ๆ และ $(V_{GS} - V_{THO}) > 0$ MOSFET จะทำงานในช่วงลิเนียร์หรือในช่วงไม่อิ่มตัวและแรงดันขาออก (หรือกระแส) จะแปรผันโดยตรงกับแรงดันขาเข้า

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

ค. สมการกระแสเมื่อ MOSFET อยู่ในช่วงอิ่มตัว (Saturation region)

ในกรณีเพิ่มแรงดัน V_{ds} จน $V_{ds} = V_{GS} - V_{THO}$

จากสมการที่ 1-8 จะได้

$$I_{ds} = \frac{\mu\varepsilon W}{LD}[(V_{GS} - V_{THO})(V_{GS} - V_{THO}) - \frac{1}{2}(V_{GS} - V_{THO})^2] \quad (1.11)$$

$$I_{ds} = \frac{1}{2}\frac{\mu\varepsilon W}{LD}(V_{GS} - V_{THO})^2 \quad (1.12)$$

สมการที่ 1-12 เป็นสมการที่ใช้การประมาณในกรณีที่ $V_{ds} > V_{GS} - V_{THO}$ จะต้องรวมเอาคุณสมบัติที่เรียกว่า Channel length modulation effect เนื่องจากแรงดันเดรนซอสทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของชั้นดีพลีชั่นรอบ ๆ รอยต่อระหว่างเดรนและแชนแนล ซึ่งทำให้ความยาวของแชนแนลไม่คงที่ โดยเมื่อ V_{ds} เพิ่มขึ้น ความยาวของแชนแนลจะลดลง ผลที่ตามมาก็คือในบริเวณอิ่มตัว I_{ds} จะไม่คงที่ แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม V_{ds} ใช้พารามิเตอร์ที่เกิดผลนี้ว่า λ (แลมด้า) หรือ Channel-Shortening coefficient เพิ่มลงในสมการที่ 1-12 โดยคูณด้วย $(1+\lambda V_{ds})$ λ จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.005 – 0.07 จากสมการที่ 1-12 จะได้

$$I_{ds} = \frac{1}{2}\frac{\mu\varepsilon W}{LD}(V_{GS} - V_{THO})^2(1+\lambda V_{ds}) \quad (1.13)$$

ในการใช้งานทางด้านอนาลอก MOSFET จะถูกไบอัสให้ทำงานในบริเวณอิ่มตัวทั้งนี้เพื่อให้ทราน- สคอนดักแตนซ์ (g_m) สูงและ Output Conductance ต่ำ

จากสมการทางไฟฟ้าของ MOSFET ในแต่ละกรณีต่างๆ ที่กล่าวมาสามารถสรุปคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ตามโมเดลได้ ดังนี้

1) ขนาดของกระแสเดรนสามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายโดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของความยาวต่อความกว้างของแชนแนลหรือตามขนาดของทรานซิสเตอร์

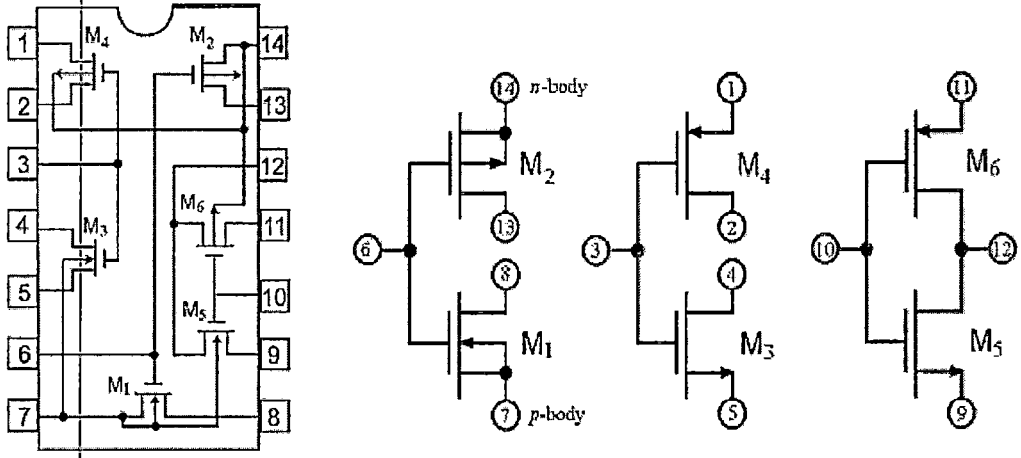
2) กรณีที่ทรานซิสเตอร์ทำงานในบริเวณไม่อิ่มตัว หากความต่างศักย์ระหว่างเดรนและซอสต่ำใกล้ศูนย์ ทรานซิสเตอร์จะแสดงตัวคล้ายเป็นตัวต้านทานแบบลิเนียร์โดยค่าความต้านทานนี้จะขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนของความกว้างและความยาวของแชนแนลและแรงดันที่เกท

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

3) สำหรับโมเดลแบบง่ายนี้ จะเห็นว่าพารามิเตอร์สามตัวที่มีความสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ได้แก่ μ หรือ mobility ของพาหะนำประจุ $C_{ox} = \varepsilon / D$ หรือคาปาซิตี้ของเกทต่อพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วยและ V_{THO} แรงดันเทรชโฮลพารามิเตอร์สองตัวแรกจะกำหนดเป็นพารามิเตอร์ตามขบวนการ (process parameter) เรียกว่า อินทรินซิคทรานสคอนดัดแตนซ์ (Intrinsic transconductance) เขียนแทนด้วย β_0 ซึ่ง $\beta_0 = \mu C_{ox}$ หรือ $\beta_0 = \mu \frac{C_{ox}}{2}$

4) แม้ว่าสมการทางไฟฟ้าที่กล่าวถึงข้างต้นจะพิจารณาแต่ต้นว่าเป็นทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ แต่ก็สามารถใช้ได้กับทรานซิสเตอร์แบบดีพลีชั่นเพียงค่าพารามิเตอร์บางตัวจะต้องเปลี่ยน

<u>โครงสร้างภายในของไอซี CD 4007</u>



รูปที่ 1.3 โครงสร้างภายในของไอซี CD 4007

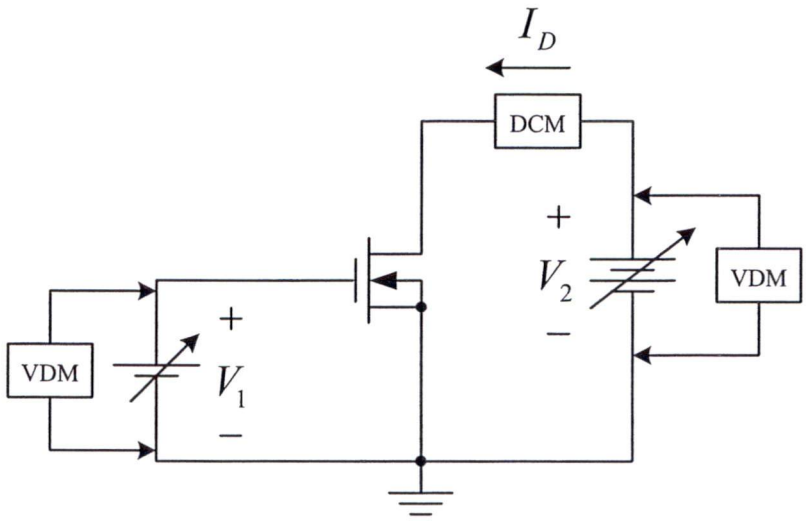
<u>เครื่องมือและอุปกรณ์</u>

1. ชุดทดลองปฏิบัติการวงจรรวมเชิงอุปมาโดยใช้ซีมอสเบื้องต้น 1 เครื่อง
2. มัลติมิเตอร์ 1 เครื่อง
3. ออสซิโลสโคป 1 เครื่อง
4. เครื่องกำเนิดสัญญาณ 1 เครื่อง
5. เครื่องคำนวณ 1 เครื่อง

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการทดลองคุณสมบัติทางเอาท์พุทของซีมอสโดยใช้วงจรประกอบตามรูปภาพที่ 1.4



รูปที่ 1.4 การวัดคุณสมบัติทางเอาท์พุทของซีมอส แบบ N-MOS

1.1 ปรับค่าแรงดัน V_2 ให้เป็น 0 V

1.2 จากนั้นปรับแรงดัน V_1 ตามตารางที่ 1.1

1.3 วัดกระแส I_D และลงบันทึกผลลงตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ผลการวัดค่ากระแส I_D

V_1	0 V	1 V	2 V	3 V	4 V
I_D					
V_1	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V
I_D					

1.4 ปรับค่าแรงดัน V_1 ให้เป็น 0 V

1.5 จากนั้นปรับแรงดัน V_2 ตามตารางที่ 1.2

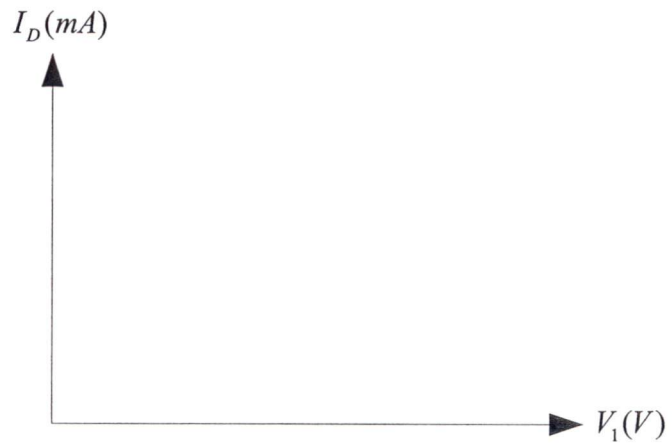
1.6 วัดกระแส I_D และลงบันทึกผลลงตารางที่ 1.2

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

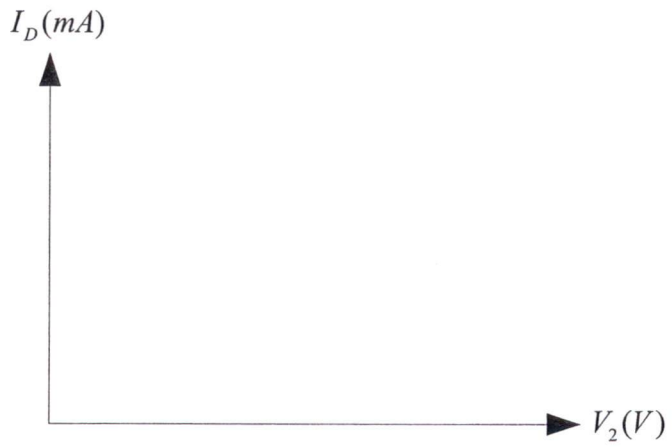
ตารางที่ 1.2 ผลการวัดค่ากระแส I_D

V_2	0 V	1 V	2 V	3 V	4 V
I_D					
V_2	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V
I_D					

1.7 นำค่าที่ได้จากตารางที่ 1.1 และตารางที่ 1.2 มาวาดลงในรูปที่ 1.5 และ 1.6 ตามลำดับ



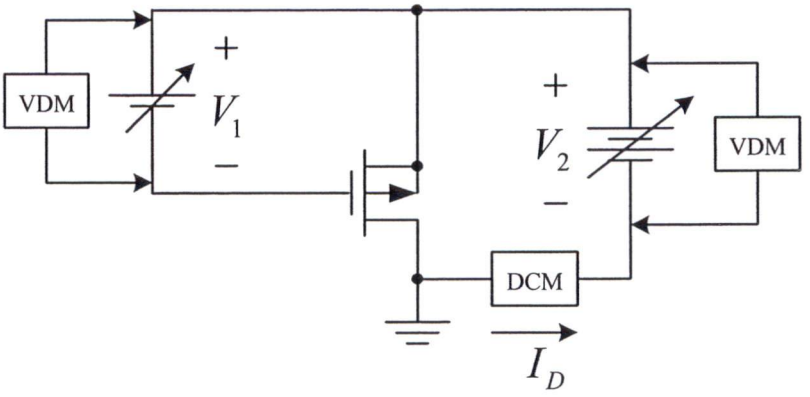
รูปที่ 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_D และ V_1 สำหรับ N-MOS



รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_D และ V_2 สำหรับ N-MOS

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

2. ทำการทดลองคุณสมบัติทางเอาท์พุทของซีมอส โดยใช้วงจรประกอบตามรูปภาพที่ 1.7



รูปที่ 1.7 การวัดคุณสมบัติทางเอาท์พุทของซีมอส แบบ P-MOS

2.1 ปรับค่าแรงดัน V_2 ให้เป็น 0 V

2.2 จากนั้นปรับแรงดัน V_1 ตามตารางที่ 1.3

2.3 วัดกระแส I_D และลงบันทึกผลลงตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 ผลการวัดค่ากระแส I_D

V_1	0 V	1 V	2 V	3 V	4 V
I_D					
V_1	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V
I_D					

2.4 ปรับค่าแรงดัน V_1 ให้เป็น 0 V

2.5 จากนั้นปรับแรงดัน V_2 ตามตารางที่ 1.4

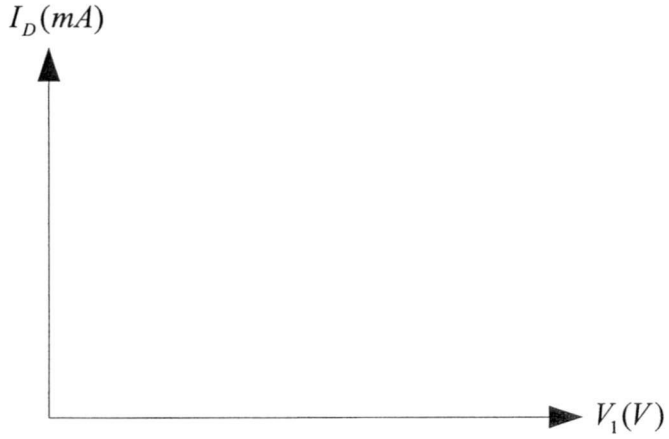
2.6 วัดกระแส I_D และลงบันทึกผลลงตารางที่ 1.4

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

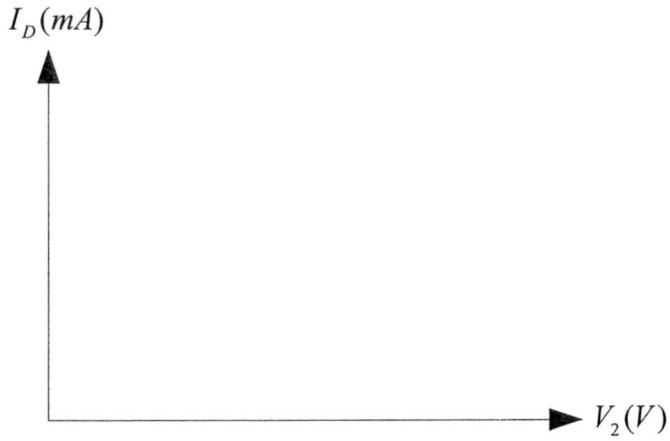
ตารางที่ 1.4 ผลการวัดค่ากระแส I_D

V_2	0 V	1 V	2 V	3 V	4 V
I_D					
V_2	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V
I_D					

2.7 นำค่าที่ได้จากตารางที่ 1.3 และตารางที่ 1.4 มาวาดลงในรูปที่ 1.7 และ 1.8 ตามลำดับ



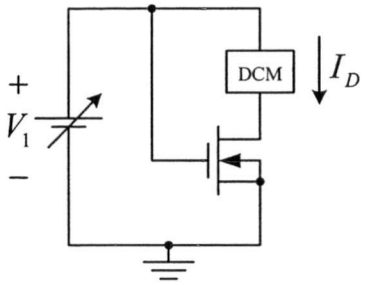
รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_D และ V_1 สำหรับ P-MOS



รูปที่ 1.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_D และ V_2 สำหรับ P-MOS

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

3. ทำการทดลองการหาค่า k และ V_t ของซีมอส โดยใช้วงจรประกอบตามรูปภาพที่ 1.9



รูปที่ 1.9 ซีมอส แบบ N-MOS

3.1 ปรับแรงดัน V_1 ตามตารางที่ 1.5

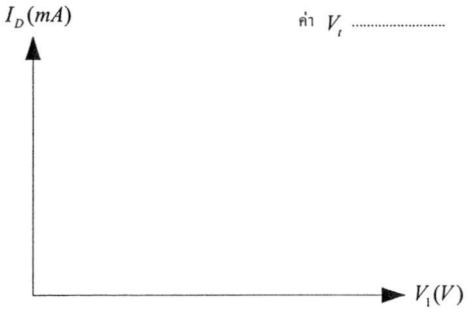
3.2 วัดกระแส I_D และลงบันทึกผลลงตารางที่ 1.5

3.3 วัดแรงดันตกคร่อม V_{ds} และลงบันทึกผลลงตารางที่ 1.5

ตารางที่ 1.5 ผลการวัดค่ากระแส I_D

V_1	0 V	1 V	2 V	3 V	4 V
I_D					
V_{ds}					
V_1	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V
I_D					
V_{ds}					

3.4 นำค่าที่ได้จากตารางที่ 1.5 มาวาดลงในรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_D และ V_1 สำหรับ N-MOS

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

3.5 จงคำนวณหาค่า k_n จาก $I_{ds} = \frac{k_n}{2}(V_{GS} - V_T)V_{ds}$

.....

.....

.....

.....

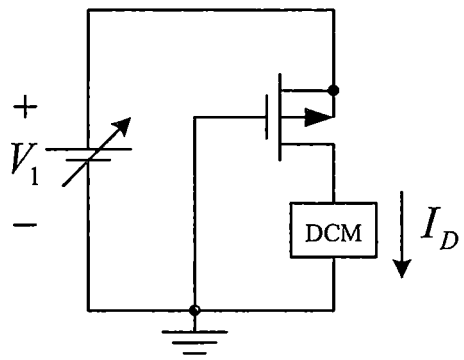
.....

.....

.....

.....

4. ทำการทดลองการหาค่า k และ V_t ของซีมอส โดยใช้วงจรประกอบตามรูปภาพที่ 1.11



รูปที่ 1.11 ซีมอส แบบ P-MOS

4.1 ปรับแรงดัน V_1 ตามตารางที่ 1.6

4.2 วัดกระแส I_D และลงบันทึกผลลงตารางที่ 1.6

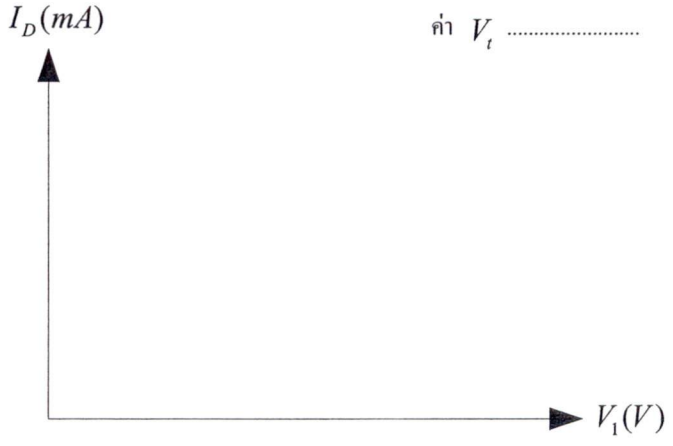
4.3 วัดแรงดันตกคร่อม V_{ds} และลงบันทึกผลลงตารางที่ 1.6

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

ตารางที่ 1.6 ผลการวัดค่ากระแส I_D

V_1	0 V	1 V	2 V	3 V	4 V
I_D					
V_{ds}					
V_1	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V
I_D					
V_{ds}					

4.4 นำค่าที่ได้จากตารางที่ 1.5 มาวาดลงในรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_D และ V_1 สำหรับ P-MOS

4.5 จงคำนวณหาค่า k_p จาก $I_{sd} = \frac{k_p}{2}(V_{SG} - V_T)V_{sd}$

.....

.....

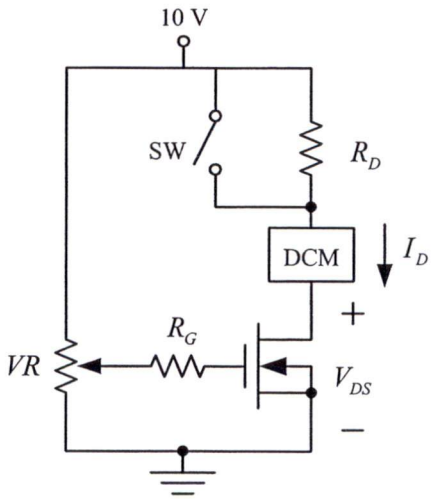
.....

.....

.....

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

5. ทำการทดลองการหาค่า λ ของซีมอสโดยใช้วงจรประกอบตามรูปภาพที่ 1.13



รูปที่ 1.13 วงจรสำหรับหาค่า λ ของซีมอส แบบ N-MOS

5.1 กำหนด R_D = 5kΩ และกำหนด R_G = 1MΩ

5.2 ปรับค่า VR ตามตารางที่ 1.7

5.3 วัดแรงดัน V_{DS} และกระแส I_D บันทึกผลลงตารางที่ 1.7

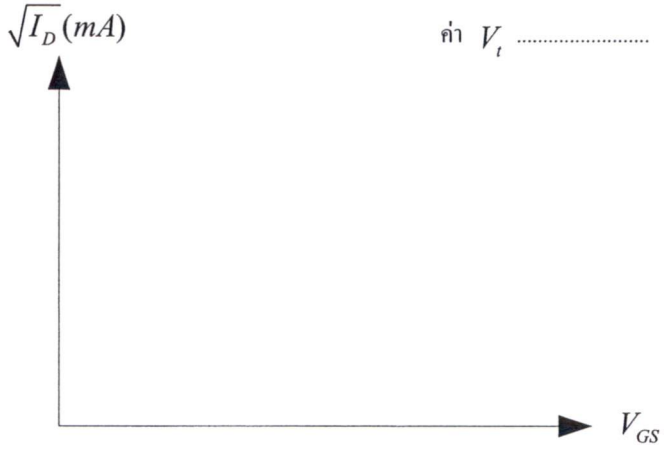
5.4 คำนวณหาค่า V_{GS} จาก $I_D = \dfrac{(V_{DD} - V_{GS})}{R_D}$ บันทึกผลลงตารางที่ 1.7

ตารางที่ 1.7 ผลการวัดค่าแรงดัน V_{DS} และกระแส I_D จากการทดลอง และคำนวณหาค่า V_{GS}

VR	0 V	1 V	2 V	3 V	4 V
V_{DS}					
I_D					
V_{GS}					
VR	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V
V_{DS}					
I_D					
V_{GS}					

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

5.5 นำค่าที่ได้จากตารางที่ 1.7 มาวาดลงในรูปที่ 1.14



รูปที่ 1.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_D}$ เทียบกับ V_{GS} สำหรับ N-MOS

5.6 จากรูปที่ 1.12 ลากเส้นจาก V_t และเลือก Slope ซึ่งค่า $Slope = \sqrt{\frac{\mu C_{OX} W}{2L}}$

5.7 คำนวณหาค่า λ จาก $I_D = \frac{1}{2}\mu C_{OX}\frac{W}{L}\left(V_{GS} - V_T\right)^2\left(1 + \lambda V_{DS}\right)$ (ยกตัวอย่างมา 1 ตัวอย่าง)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

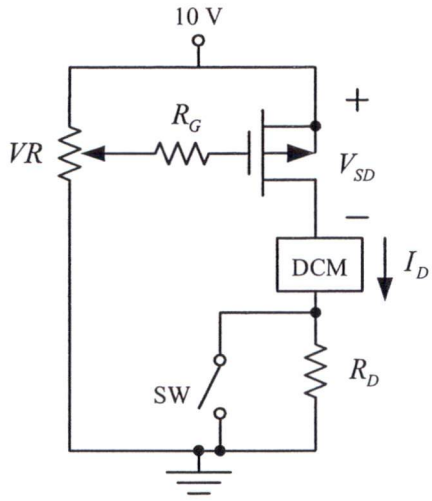
.....

.....

.....

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

6. ทำการทดลองการหาค่า λ ของซีมอสโดยใช้วงจรประกอบตามรูปภาพที่ 1.15



รูปที่ 1.15 วงจรสำหรับหาค่า λ ของซีมอส แบบ P-MOS

6.1 กำหนด R_D = 5kΩ และกำหนด R_G = 1MΩ

6.2 ปรับค่า VR ตามตารางที่ 1.8

6.3 วัดแรงดัน V_{SD} และกระแส I_D บันทึกผลลงตารางที่ 1.8

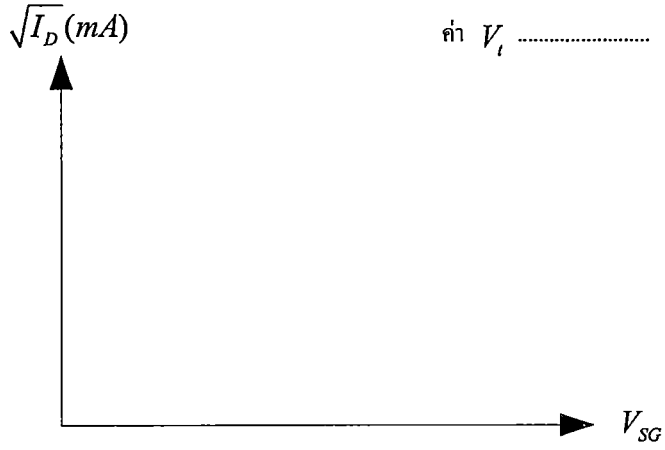
6.4 คำนวณหาค่า V_{SG} จาก $I_D = \dfrac{(V_{DD} - V_{SG})}{R_D}$ บันทึกผลลงตารางที่ 1.8

ตารางที่ 1.8 ผลการวัดค่าแรงดัน V_{SD} และกระแส I_D จากการทดลอง และคำนวณหาค่า V_{SG}

VR	0 V	1 V	2 V	3 V	4 V
V_{SD}					
I_D					
V_{SG}					
VR	5 V	6 V	7 V	8 V	9 V
V_{SD}					
I_D					
V_{SG}					

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

6.5 นำค่าที่ได้จากตารางที่ 1.8 มาวาดลงในรูปที่ 1.16



รูปที่ 1.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_D}$ เทียบกับ V_{SG} สำหรับ P-MOS

6.6 จากรูปที่ 1.12 ลากเส้นจาก V_t และเลือก Slope ซึ่งค่า $Slope = \sqrt{\frac{\mu C_{ox} W}{2L}}$

6.7 คำนวณหาค่า λ จาก $I_D = \frac{1}{2}\mu C_{OX}\frac{W}{L}\left(V_{SG} - V_T\right)^2\left(1 + \lambda V_{SD}\right)$ (ยกตัวอย่างมา 1 ตัวอย่าง)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส

การทดลองที่ 1	**เรื่อง:** การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส	1:30 ชั่วโมง

7. สรุปผลการทดลองที่ 1.1 และการทดลองที่ 1.2 มาพอสังเขป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

8. สรุปผลการทดลองที่ 1.3 และการทดลองที่ 1.4 มาพอสังเขป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

9. สรุปผลการทดลองที่ 1.5 และการทดลองที่ 1.6 มาพอสังเขป

.....

.....

.....

.....

.....

.....

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	แบบทดสอบ	1:30 ชั่วโมง

<u>คำชี้แจง</u> : ข้อสอบมีทั้งหมด 10 ข้อ ให้เลือกข้อที่ถูกที่สุด และให้ใช้เวลาในการทำ 20 นาที

1. ทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟต มีข้อได้เปรียบกว่าทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์อะไรบ้าง

ก. มอสเฟตจะมีความต้านทานอินพุตสูงกว่าไบโพลาร์

ข. มีสัญญาณรบกวนต่ำ

ค. มีรูปลักษณ์ของวงจรง่ายกว่า

ง. ถูกทุกข้อ

จ. ถูกเฉพาะข้อ ก. และ ข้อ ข.

2. แรงดัน V_{GS} หมายถึง

ก. ศักดาไฟฟ้าที่เกทอ้างอิงกับซอส

ข. ศักดาไฟฟ้าที่ซอลอ้างอิงกับเกท

ค. ศักดาไฟฟ้าที่เดรนอ้างอิงกับซอส

ง. ศักดาไฟฟ้าที่ซอสอ้างอิงกับเดรน

จ. ศักดาไฟฟ้าที่เดรนอ้างอิงกับเกท

3. ค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน คือ

ก. V_{DD}

ข. V_{SD}

ค. V_{THO}

ง. V_T

จ. ถูกเฉพาะข้อ ค. และ ข้อ ง.

4. คุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ตามโมเดลข้อใดถูก

ก. ขนาดของกระแสซอลสามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายโดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของความยาวต่อความกว้างของแชนแนลหรือตามขนาดของทรานซิสเตอร์

ข. ขนาดของกระแสเดรนสามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายโดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของความยาวต่อความกว้างของแชนแนลหรือตามขนาดของทรานซิสเตอร์

ค. ขนาดของกระแสเกทสามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายโดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของความยาวต่อความกว้างของแชนแนลหรือตามขนาดของทรานซิสเตอร์

ง. ขนาดของกระแสเดรนสามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายโดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของความยาวต่อความกว้างกำลังสองของแชนแนลหรือตามขนาดของทรานซิสเตอร์

จ. ขนาดของกระแสซอลสามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายโดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของความยาวต่อความกว้างกำลังสองของแชนแนลหรือตามขนาดของทรานซิสเตอร์

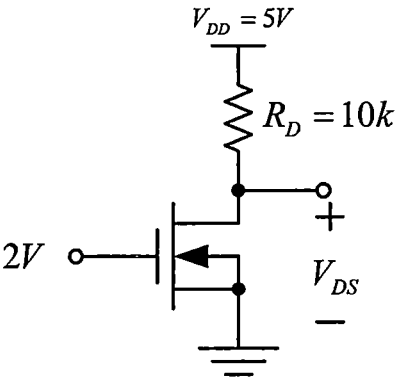
หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**แบบทดสอบ**	1:30 ชั่วโมง

5. ค่า Channel-Shortening coefficient คือค่าอะไร

ก. V_{THO} ข. μ ค. ε

ง. λ จ. k

จากรูปที่ 1 จงตอบคำถามในข้อ 6 – ข้อ 10



รูปที่ 1

6. กำหนดให้ $k_p = 100\mu A/V^2$, $\frac{W}{L} = 3$, $V_T = 0.5V$, $\lambda = 0$ ไม่ทราบค่า V_{DS} จึงสมมุติโหมดการทำงานเป็นโหมดอิ่มตัว จงคำนวณหาค่า I_D

ก. 337.5 μA ข. 338.5 μA ค. 339.5 μA

ง. 340.5 μA จ. 341.5 μA

7. จากข้อ 6 ค่า V_{DS} มีค่าเท่าไหร่

ก. 0.63 V ข. 0.83 V ค. 0.93 V

ง. 1.63 V จ. 2.63 V

8. จากข้อ 6 และ 7 ถ้า $\lambda = 1$ จงคำนวณหาค่า I_D

ก. 887.63 μA ข. 888.63 μA ค. 889.63 μA

ง. 890.63 μA จ. 891.63 μA

หน่วยที่ 1 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส		
การทดลองที่ 1	**แบบทดสอบ**	1:30 ชั่วโมง

9. ถ้าเปลี่ยน V_{GS} เป็น 2.5 V ทำงานในโหมดอิ่มตัว จงหาค่า I_D

ก. 500 μA ข. 550 μA ค. 600 μA

ง. 650 μA จ. 700 μA

10. จากข้อ 9 ค่า V_{DS} มีค่าเท่าไหร่

ก. 0 V ข. 1 V ค. 2 V

ง. -1 V จ. -2 V

แบบบันทึกคะแนนการวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนภาคปฏิบัติ

ชื่อ.....รหัสนักศึกษา.....ใบงานทดลองที่.....1.....

นักศึกษาระดับ ปริญญาตรี สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำชี้แจง ให้ใส่เครื่องหมาย ✓ ลงในช่องคะแนนที่ตรงกับการสังเกตของท่าน โดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนด

คุณลักษณะที่ต้องการวัด	น้ำหนักคะแนน	คะแนน		
		2	1	0
1. การปฏิบัติ				
1.1 เลือกค่าอุปกรณ์ในวงจร	2	.....	.....	.....
1.2 ใช้เครื่องมือในการวัดค่ากระแสจุดต่างๆ	2	.....	.....	.....
1.3 ใช้เครื่องมือในการวัดค่าแรงดันจุดต่างๆ	2	.....	.....	.....
1.4 เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการทดลอง	2	.....	.....	.....
รวมคะแนน	8			
2. ผลงาน				
2.1 ค่ากระแสที่วัดได้ถูกต้อง	2	.....	.....	.....
2.2 ค่าแรงดันที่วัดได้ถูกต้อง	2	.....	.....	.....
2.3 ค่า k และ V_t ที่คำนวณได้ถูกต้อง	4	.....	.....	.....
2.4 ค่า λ ที่คำนวณได้ถูกต้อง	4	.....	.....	.....
2.5 ตอบคำถามท้ายการทดลองได้ถูกต้อง	4	.....	.....	.....
2.6 สรุปผลการทดลองได้ถูกต้อง	4	.....	.....	.....
รวมคะแนน	20			
คะแนนรวมทั้งการปฏิบัติและผลงาน	28			
คะแนนรวมทั้งหมด	28			

เกณฑ์การให้คะแนน แบบทดสอบวัดสัมฤทธิ์ทางการเรียน (ภาคปฏิบัติ)

1. การปฏิบัติงานของใบงานทดลองที่ 1

1.1 เลือกค่าอุปกรณ์ในวงจร

2 คะแนน เมื่อ เลือกค่าอุปกรณ์ได้ถูกต้อง

1 คะแนน เมื่อ เลือกค่าอุปกรณ์ผิดไม่เกิน 2 ครั้ง

0 คะแนน เมื่อ เลือกค่าอุปกรณ์ผิดเกิน 2 ครั้ง

1.2 ใช้เครื่องมือในการวัดค่ากระแสจุดต่างๆ

2 คะแนน เมื่อ ใช้เครื่องมือในการวัดค่ากระแสได้ถูกต้อง

1 คะแนน เมื่อ ใช้เครื่องมือในการวัดค่ากระแสผิดไม่เกิน 2 ครั้ง

0 คะแนน เมื่อ ใช้เครื่องมือในการวัดค่ากระแสผิดเกิน 2 ครั้ง

1.3 ใช้เครื่องมือในการวัดค่าแรงดันจุดต่างๆ

2 คะแนน เมื่อ ใช้เครื่องมือในการวัดค่าแรงดันได้ถูกต้อง

1 คะแนน เมื่อ ใช้เครื่องมือในการวัดค่าแรงดันผิดไม่เกิน 2 ครั้ง

0 คะแนน เมื่อ ใช้เครื่องมือในการวัดค่าแรงดันผิดเกิน 2 ครั้ง

1.4 เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการทดลอง

2 คะแนน เมื่อ งานเสร็จก่อนเวลาที่กำหนด หรือภายในเวลาที่กำหนด

1 คะแนน เมื่อ งานเสร็จหลังเวลาที่กำหนดไม่เกิน 5 นาที

0 คะแนน เมื่อ งานเสร็จหลังเวลาที่กำหนดเกิน 5 นาที

2. ผลงานของใบงานทดลองที่ 1

2.1 ค่ากระแสที่วัดได้ถูกต้อง

2 คะแนน เมื่อ ค่ากระแสที่วัดได้ถูกต้อง

1 คะแนน เมื่อ ค่ากระแสที่วัดได้ผิดไม่เกิน 2 ครั้ง

0 คะแนน เมื่อ ค่ากระแสที่วัดได้ผิดเกิน 2 ครั้ง

2.2 ค่าแรงดันที่วัดได้ถูกต้อง

2 คะแนน เมื่อ ค่าแรงดันที่วัดได้ถูกต้อง

1 คะแนน เมื่อ ค่าแรงดันที่วัดได้ผิดไม่เกิน 2 ครั้ง

0 คะแนน เมื่อ ค่าแรงดันที่วัดได้ผิดเกิน 2 ครั้ง

2.3 ค่า k และ V_t ที่คำนวณได้ถูกต้อง

4 คะแนน เมื่อ ค่า k และ V_t ที่คำนวณได้ถูกต้อง

2 คะแนน เมื่อ ค่า k และ V_t ที่คำนวณได้ผิดไม่เกิน 2 ครั้ง

0 คะแนน เมื่อ ค่า k และ V_t ที่คำนวณได้ผิดเกิน 2 ครั้ง

2.4 ค่า λ ที่คำนวณได้ถูกต้อง

4 คะแนน เมื่อ ค่า λ ที่คำนวณได้ถูกต้อง

2 คะแนน เมื่อ ค่า λ ที่คำนวณได้ผิดไม่เกิน 2 ครั้ง

0 คะแนน เมื่อ ค่า λ ที่คำนวณได้ผิดเกิน 2 ครั้ง

2.5 ตอบคำถามท้ายการทดลองได้ถูกต้อง

4 คะแนน เมื่อ ตอบคำถามท้ายการทดลองได้ถูกต้อง

2 คะแนน เมื่อ ตอบคำถามท้ายการทดลองผิดไม่เกิน 2 ข้อ

0 คะแนน เมื่อ ตอบคำถามท้ายการทดลองผิดเกิน 2 ข้อ

2.6 สรุปผลการทดลองได้ถูกต้อง

4 คะแนน เมื่อ สรุปผลการทดลองได้ถูกต้อง

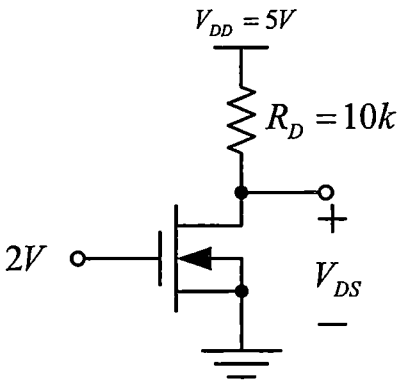
2 คะแนน เมื่อ สรุปผลการทดลองได้ใกล้เคียง

0 คะแนน เมื่อ สรุปผลการทดลองไม่ได้

แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรวม

<u>คำสั่ง</u> ให้ตอบคำถามทั้งหมด 20 ข้อ ภายในเวลา 30 นาที โดยเลือกคำตอบที่ถูกที่สุดเพียงข้อเดียว กากบาทลงในกระดาคำตอบ

จากรูปที่ 1 จงตอบคำถามในข้อ 1 – ข้อ 5



รูปที่ 1

1. กำหนดให้ $k_p = 100\mu A/V^2$, $\frac{W}{L} = 3$, $V_T = 0.5V$, $\lambda = 0$ ไม่ทราบค่า V_{DS} จึงสมมุติโหมดการทำงานเป็นโหมดอิ่มตัว จงคำนวณหาค่า I_D

ก. 337.5 μA ข. 338.5 μA ค. 339.5 μA

ง. 340.5 μA จ. 341.5 μA

2. จากข้อ 1 ค่า V_{DS} มีค่าเท่าไหร่

ก. 0.63 V ข. 0.83 V ค. 0.93 V

ง. 1.63 V จ. 2.63 V

3. จากข้อ 1 และ 2 ถ้า $\lambda = 1$ จงคำนวณหาค่า I_D

ก. 887.63 μA ข. 888.63 μA ค. 889.63 μA

ง. 890.63 μA จ. 891.63 μA

4. ถ้าเปลี่ยน V_{GS} เป็น 2.5 V ทำงานในโหมดอิ่มตัว จงหาค่า I_D

ก. 500 μA ข. 550 μA ค. 600 μA

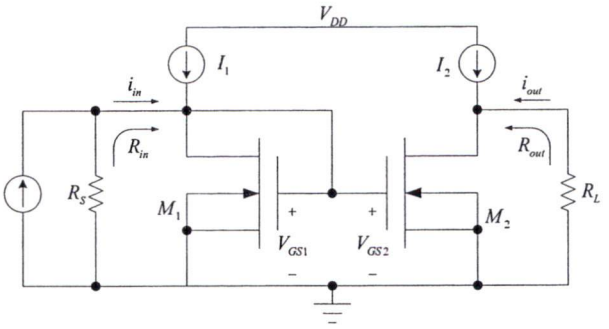
ง. 650 μA จ. 700 μA

5. จากข้อ 4 ค่า V_{DS} มีค่าเท่าไหร่

ก. 0 V ข. 1 V ค. 2 V

ง. -1 V จ. -2 V

6. จากรูปที่ 2 ประกอบไปด้วย MOSFET แบบใดบ้าง



รูปที่ 2 วงจรสะท้อนกระแสพื้นฐาน

ก. N-MOS กับ N-MOS ข. N-MOS กับ P-MOS ค. P-MOS กับ P-MOS

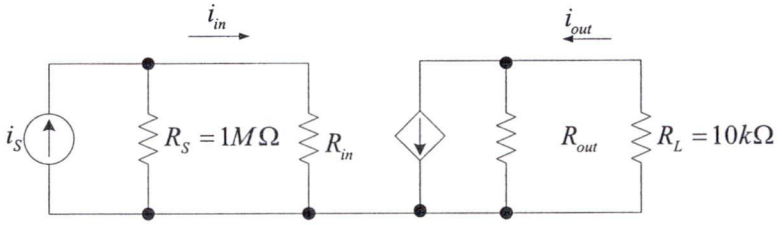
ง. P-MOS กับ N-MOS จ. ไม่มีข้อใดถูก

7. R_{in} คืออะไร

ก. ความต้านทานทางด้านอินพุท ข. ความต้านทานทางด้านเอาท์พุท ค. ความต้านทานรวม

ง. ความต้านทานเสมือนทางด้านอินพุท จ. ความต้านทานเสมือนทางด้านเอาท์พุท

จากรูปที่ 3 ใช้ตอบคำถามในข้อ 8 - 10



รูปที่ 3 วงจรเสมือนของวงจรสะท้อนกระแสพื้นฐาน

8. ถ้า $g_{m1} = \sqrt{2\mu_n C_{OX}(W/L)_1 I_1}$ โดยที่ $I_1 = 400\mu A$, $\mu_n C_{OX}(W/L)_1 = 0.5mA/V^2$ อยากทราบว่า R_{in} จะมีค่าประมาณเท่าไร

ก. 1.5 kΩ ข. 1.6 kΩ ค. 1.7 kΩ

ง. 1.8 kΩ จ. 1.9 kΩ

9. จากข้อ 7 ค่า R_{out} มีค่าเท่าไร เมื่อกำหนดให้ $\lambda = 0.01V^{-1}$

ก. 100 kΩ ข. 150 kΩ ค. 200 kΩ

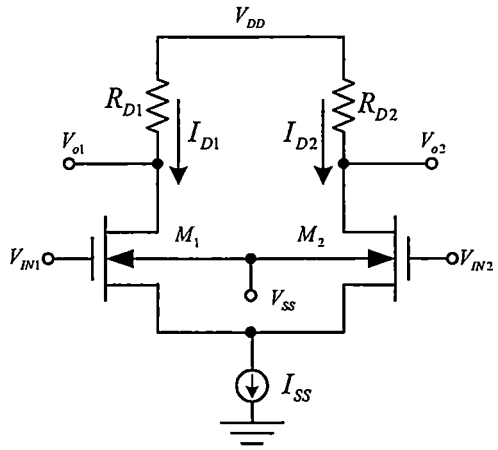
ง. 250 kΩ จ. 300 kΩ

10. I_{in} มีค่าเท่าไร

ก. 0.998 A ข. 0.988 A ค. 0.978 A

ง. 0.968 A จ. 0.958 A

จากรูปที่ 4 จงตอบคำถามตั้งแต่ข้อ 11 – ข้อ 15



รูปที่ 4

11. ถ้ากำหนดให้ $V_{DD}=10V$, $R_{D1}=R_{D2}=16k\ \Omega$, $K_1=0.1mA/V^2$, $K_2=0.2mA/V^2$ และ $V_T=1V$ จงหาค่า I_{D1} และ I_{D2} ว่ามีค่าเท่าไร

ก. 0.6 mA กับ 0.6 mA ข. 0.625 mA กับ 0.625 mA ค. 0.6 mA กับ 0.625 mA

ง. 0.625 mA กับ 0.6 mA จ. 0.65 mA กับ 0.65 mA

12. จากข้อ 11 จงหาค่า $V_{IN1}-V_{IN2}$

ก. 1.015 V ข. 1.036 V ค. 1.086 V

ง. 0.964 V จ. 1.056 V

13. ถ้าให้ค่า V_{GS} มีค่าเท่ากับ 2 เท่าของคำตอบในข้อ 12 และให้ค่า $\mu_n C_{ox}(W/L)=0.6mA/V^2$ จงหาคำนวณค่า I_{SS}

ก. 0.25 mA ข. 0.318 mA ค. 0.345 mA

ง. 0.37 mA จ. 0.412 mA

14. จากข้อ 13 กระแสที่ไหลผ่าน M_1 และ M_2 มีค่าเท่ากับ

ก. 0.125 mA ข. 0.159 mA ค. 0.1725 mA

ง. 0.185 mA จ. 0.206 mA

15. ถ้ากำหนดให้ $K=0.2mA/V^2$ จงหาค่า A_v

ก. -4.59 ข. -4.35 ค. -3.577

ง. -4.203 จ. -4.035

16. ออปแอมป์สองภาคดีกว่าออปแอมป์หนึ่งภาคอย่างไร

ก. อัตราขยายแรงดันมากกว่า ข. ช่วงสวิงสัญญาณเอาท์พุทที่แคบกว่า

ค. สูญเสียกำลังงานน้อยกว่า ง. มีเสถียรภาพที่ดีกว่า จ. ถูกทุกข้อ

17. ข้อบกพร่องของออปแอมป์สองภาคเมื่อเทียบกับออปแอมป์หนึ่งภาคคือ

ก. อัตราขยายแรงดันน้อยกว่า ข. ช่วงสวิงสัญญาณเอาท์พุทที่กว้างกว่า

ค. สูญเสียกำลังงานมากกว่าหลายเท่า ง. ไม่มีเสถียรภาพ จ. ผิดทุกข้อ

18. ออปแอมป์สองภาคแบ่งออกเป็นภาคอะไรบ้าง

ก. Voltage -to- Voltage และ Voltage -to- Voltage

ข. Voltage -to- current และ Voltage -to- Voltage

ค. Voltage -to- current และ current -to- Voltage

ง. Voltage -to- current และ current -to- current

จ. current -to- current และ current -to- current

19. อัตราขยายของวงจรออปแอมป์สองภาคคือ

ก. $A_v = \left(\frac{v_1}{v_{in}}\right)\left(\frac{v_{out}}{v_2}\right)$ ข. $A_v = \left(\frac{v_2}{v_{in}}\right)\left(\frac{v_{out}}{v_1}\right)$ ค. $A_v = \left(\frac{v_{in}}{v_2}\right)\left(\frac{v_{out}}{v_2}\right)$

ง. $A_v = \left(\frac{v_2}{v_{in}}\right)\left(\frac{v_2}{v_{out}}\right)$ จ. $A_v = \left(\frac{v_2}{v_{in}}\right)\left(\frac{v_{out}}{v_2}\right)$

20. ข้อใดไม่ใช่ขั้นตอนในการออกแบบวงจรออปแอมป์สองภาค

ก. กำหนดเกณฑ์ A_{v1} ที่ต้องการ ข. กำหนดกระแสไบอัส I_d ค. หาค่า R_d

ง. หาค่า g_m จ. หาค่า $\frac{W}{2L}$ ของมอสแต่ละตัว

ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ตารางที่ จ.1 แสดงคะแนนที่ได้จากการทดลองระหว่างเรียนเพื่อหาประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

คนที่	ใบงานทดลองที่ (คะแนนเต็ม)			
	1 (38)	2 (38)	3 (36)	4 (38)
1	31	35	33	33
2	32	34	31	31
3	35	32	33	34
4	28	29	30	30
5	34	31	35	35
6	33	34	35	35
7	29	27	26	27
8	28	28	27	27
9	34	36	30	30
10	33	34	31	33
11	31	30	32	34
12	32	36	33	32
รวม	380	386	376	381
เฉลี่ย	31.67	32.17	31.33	31.75
เฉลี่ยร้อยละ	83.33	84.65	87.04	83.55
เฉลี่ยทั้งหมด	E_1 = 84.64			

ตารางที่ จ.2 แสดงคะแนนที่ได้จากแบบทดสอบรวมหลังการเรียนเพื่อหาประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส

คนที่	คะแนนสอบหลังการทดลอง (48 คะแนน)
1	42
2	40
3	41
4	38
5	42

ตารางที่ จ.2 แสดงคะแนนที่ได้จากแบบทดสอบรวมหลังการเรียนเพื่อหาประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกเบื้องต้นโดยใช้ซีมอส(ต่อ)

	คนที่	คะแนนสอบหลังการทดลอง (48 คะแนน)
	6	43
	7	37
	8	36
	9	38
	10	37
	11	40
	12	39
	รวม	473
	เฉลี่ย	39.41
	เฉลี่ยร้อยละ	82.10
	เฉลี่ยทั้งหมด	E_2 = 82.10

ตารางที่ จ.3 แสดงค่าเฉลี่ยผลการวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้องระหว่างแบบทดสอบกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมของผู้ทรงคุณวุฒิ เรื่อง การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส

แบบทดสอบ (ข้อที่)	ผู้ทรงคุณวุฒิ					รวม	ค่าเฉลี่ย
	คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3	คนที่ 4	คนที่ 5		
1	1	1	1	1	1	5	1
2	1	1	1	1	1	5	1
3	1	1	1	1	1	5	1
4	1	1	1	1	1	5	1
5	1	1	1	1	1	5	1
6	1	1	1	1	1	5	1
7	1	1	1	1	1	5	1
8	1	1	1	1	1	5	1
9	1	1	1	1	1	5	1
10	1	1	1	1	1	5	1

ตารางที่ จ.4 แสดงค่าเฉลี่ยผลการวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้องระหว่างแบบทดสอบกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมของผู้ทรงคุณวุฒิ เรื่อง การศึกษาเกี่ยวกับแหล่งจ่ายกระแสและวงจรสะท้อนกระแส

แบบทดสอบ (ข้อที่)	ผู้ทรงคุณวุฒิ					รวม	ค่าเฉลี่ย
	คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3	คนที่ 4	คนที่ 5		
1	1	1	1	1	1	5	1
2	1	1	1	1	1	5	1
3	1	1	1	1	1	5	1
4	1	1	1	1	1	5	1
5	1	1	1	1	1	5	1
6	1	1	1	1	1	5	1
7	1	1	1	1	1	5	1
8	1	1	1	1	1	5	1
9	1	1	1	1	1	5	1
10	1	1	1	1	1	5	1

ตารางที่ จ.5 แสดงค่าเฉลี่ยผลการวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้องระหว่างแบบทดสอบกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมของผู้ทรงคุณวุฒิ เรื่อง การศึกษาเกี่ยวกับตัวขยายความแตกต่าง

แบบทดสอบ (ข้อที่)	ผู้ทรงคุณวุฒิ					รวม	ค่าเฉลี่ย
	คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3	คนที่ 4	คนที่ 5		
1	1	1	1	1	1	5	1
2	1	1	1	1	1	5	1
3	1	1	1	1	1	5	1
4	1	1	1	1	1	5	1
5	1	1	1	1	1	5	1
6	1	1	1	1	1	5	1
7	1	1	1	-1	1	3	0.6
8	1	1	1	1	1	5	1
9	1	1	1	1	1	5	1
10	1	1	1	1	1	5	1

ตารางที่ จ.6 แสดงค่าเฉลี่ยผลการวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้องระหว่างแบบทดสอบกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมของผู้ทรงคุณวุฒิ เรื่อง การศึกษาเกี่ยวกับวงจรออปแอมป์สองภาค

แบบทดสอบ (ข้อที่)	ผู้ทรงคุณวุฒิ					รวม	ค่าเฉลี่ย
	คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3	คนที่ 4	คนที่ 5		
1	1	1	1	1	1	5	1
2	1	1	1	1	1	5	1
3	1	1	1	1	1	5	1
4	1	1	1	1	1	5	1
5	1	1	1	1	1	5	1
6	1	1	1	1	1	5	1
7	1	1	1	1	1	5	1
8	1	1	1	-1	1	3	0.6
9	1	1	1	1	1	5	1
10	1	1	1	-1	1	3	0.6

ตารางที่ จ.7 แสดงค่าเฉลี่ยผลการวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้องระหว่างแบบทดสอบรวมกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมของผู้ทรงคุณวุฒิ

แบบทดสอบ		ผู้ทรงคุณวุฒิ					รวม	ค่าเฉลี่ย
ใบงาน	ข้อที่	คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3	คนที่ 4	คนที่ 5		
1	1	1	1	1	0	1	4	0.8
	2	1	1	1	0	1	4	0.8
	3	1	1	1	0	1	4	0.8
	4	1	1	1	0	1	4	0.8
	5	1	1	1	0	1	4	0.8
2	6	1	1	1	1	1	5	1
	7	1	1	1	1	1	5	1
	8	1	1	1	0	1	4	0.8
	9	1	1	1	1	1	5	1
	10	1	1	1	0	1	4	0.8

ตารางที่ จ.7 แสดงค่าเฉลี่ยผลการวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้องระหว่างแบบทดสอบรวมกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมของผู้ทรงคุณวุฒิ (ต่อ)

แบบทดสอบ		ผู้ทรงคุณวุฒิ					รวม	ค่าเฉลี่ย
ใบงาน	ข้อที่	คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3	คนที่ 4	คนที่ 5		
3	11	1	1	1	1	1	5	1
	12	1	1	1	0	1	4	0.8
	13	1	1	1	1	1	5	1
	14	1	1	1	0	1	4	0.8
	15	1	1	1	0	1	4	0.8
4	16	1	1	1	1	1	5	1
	17	1	1	1	1	1	5	1
	18	1	1	1	1	1	5	1
	19	1	1	1	1	1	5	1
	20	1	1	1	1	1	5	1

ตารางที่ จ.8 แสดงค่าเฉลี่ยผลการวิเคราะห์ความตรงตามเนื้อหาและน้ำหนักคะแนนของผู้ทรงคุณวุฒิแบบสังเกตพฤติกรรมทั่วไป เรื่อง การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของซีมอส

พฤติกรรม	น้ำหนักคะแนน	ความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ					รวม	ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5		
1. เลือกค่าอุปกรณ์ในวงจร	2	1	1	1	0	1	4	0.8
2.ใช้เครื่องมือในการวัดค่ากระแสจุดต่างๆ	2	1	1	1	1	1	5	1
3.ใช้เครื่องมือในการวัดค่าแรงดันจุดต่างๆ	2	1	1	1	1	1	5	1
4. เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการทดลอง	2	1	1	1	0	0	3	0.6
5. ค่ากระแสที่วัดได้ถูกต้อง	2	1	1	1	1	1	5	1
6. ค่าแรงดันที่วัดได้ถูกต้อง	2	1	1	1	1	1	5	1
7. ค่า k และ V_i ที่คำนวณได้ถูกต้อง	4	1	1	1	1	1	5	1
8. ค่า λ ที่คำนวณได้ถูกต้อง	4	1	1	1	1	1	5	1
9. ตอบคำถามท้ายการทดลองได้ถูกต้อง	4	1	1	1	1	1	5	1
10. สรุปผลการทดลองได้ถูกต้อง	4	1	1	1	1	1	5	1

ตารางที่ จ.9 แสดงค่าเฉลี่ยผลการวิเคราะห์ความตรงตามเนื้อหาและน้ำหนักคะแนนขอผู้ทรงคุณวุฒิ แบบสังเกตพฤติกรรมทั่วไป เรื่อง การศึกษาเกี่ยวกับแหล่งจ่ายกระแส และวงจรสะท้อนกระแส

พฤติกรรม	น้ำหนักคะแนน	ความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ					รวม	ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5		
1. เลือกและกำหนดค่าอุปกรณ์ในวงจร	2	1	1	1	1	1	5	1
2.ใช้เครื่องมือในการวัดค่ากระแสจุดต่างๆ	2	1	1	1	1	1	5	1
3. ใช้สายสัญญาณวัดรูปสัญญาณจุดต่างๆ	2	1	1	1	1	1	5	1
4. เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการทดลอง	2	1	1	1	0	1	4	0.8
5. ค่ากระแสที่คำนวณได้ถูกต้อง	4	1	1	1	1	1	5	1
6. ค่ากำเนิดความถี่ที่วัดได้ถูกต้อง	4	1	1	1	1	1	5	1
7. ค่ากำเนิดความถี่ที่คำนวณได้ถูกต้อง	4	1	1	1	1	1	5	1
8. รูปสัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้ถูกต้อง	4	1	1	1	0	1	4	0.8
9. ตอบคำถามท้ายการทดลองได้ถูกต้อง	4	1	1	1	1	1	5	1
10. สรุปผลการทดลองได้ถูกต้อง	4	1	1	1	1	1	5	1

ตารางที่ จ.10 แสดงค่าเฉลี่ยผลการวิเคราะห์ความตรงตามเนื้อหาและน้ำหนักคะแนนของทรงคุณวุฒิ แบบสังเกตพฤติกรรมทั่วไป เรื่อง การศึกษาเกี่ยวกับตัวขยายความแตกต่าง

พฤติกรรม	น้ำหนักคะแนน	ความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ					รวม	ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5		
1. จ่ายสัญญาณอินพุต	2	1	1	1	1	1	5	1
2. กำหนดค่าอุปกรณ์ในวงจร	2	1	1	1	1	1	5	1
3.ใช้เครื่องมือในการวัดค่ากระแสจุดต่างๆ	2	1	1	1	1	1	5	1
4. ใช้สายสัญญาณวัดรูปสัญญาณจุดต่างๆ	2	1	1	1	0	1	4	0.8
5. เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการทดลอง	2	1	1	1	1	0	4	0.8
6. สัญญาณอินพุตถูกต้อง	4	1	1	1	1	1	5	1
7. ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ถูกต้อง	4	1	1	1	1	1	5	1
8. ตอบคำถามท้ายการทดลองได้ถูกต้อง	4	1	1	1	0	1	4	0.8
9. สรุปผลการทดลองได้ถูกต้อง	4	1	1	1	1	1	5	1

ตารางที่ จ.11 แสดงค่าเฉลี่ยผลการวิเคราะห์ความตรงตามเนื้อหาและน้ำหนักคะแนนของทรงคุณวุฒิแบบสังเกตพฤติกรรมทั่วไป เรื่อง การศึกษาเกี่ยวกับวงจรออปแอมป์สองภาค

พฤติกรรม	น้ำหนักคะแนน	ความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ					รวม	ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5		
1. จ่ายสัญญาณอินพุต	2	1	1	1	1	1	5	1
2. กำหนดค่าอุปกรณ์ในวงจร	2	1	1	1	1	1	5	1
3.ใช้เครื่องมือในการวัดค่ากระแสจุดต่างๆ	2	1	1	1	1	1	5	1
4.ใช้เครื่องมือในการวัดค่าความต้านทานจุดต่างๆ	2	1	1	1	0	1	4	0.8
5. ใช้สายสัญญาณวัดรูปสัญญาณจุดต่างๆ	2	1	1	1	1	0	4	0.8
6. เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการทดลอง	2	1	1	1	1	1	5	1
7. สัญญาณอินพุตถูกต้อง	2	1	1	1	1	1	5	1
8. ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ถูกต้อง	2	1	1	1	0	1	4	0.8
9. ค่าความต้านทานที่วัดได้ถูกต้อง	2	1	1	1	1	1	5	1
10. ค่าแรงดันเอาต์พุตที่คำนวณได้ถูกต้อง	2	1	1	1	1	1	5	1
11. รูปสัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้ถูกต้อง	4	1	1	1	1	1	5	1
12. สรุปผลการทดลองได้ถูกต้อง	4	1	1	1	1	1	5	1

ตารางที่ จ.12 แสดงผลการวิเคราะห์คุณภาพของชุดทดลองปฏิบัติการ ของทรงคุณวุฒิ

รายการประเมิน	ผู้ทรงคุณวุฒิ คนที่					ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับคุณภาพ
	1	2	3	4	5			
1. ขนาดความเหมาะสมของชุดทดลอง	5	5	4	4	5	4.60	0.55	ดีมาก
2.รูปแบบของชุดทดลองก่อให้เกิดแรงจูงใจ	5	5	3	4	5	4.40	0.89	ดี
3. ความเหมาะสมของการวางอุปกรณ์	4	5	4	4	5	4.40	0.55	ดี
4. ความแข็งแรงทดทานของชุดทดลอง	5	5	5	4	5	4.80	0.45	ดีมาก
5. ความเหมาะสมของวัสดุที่นำมาใช้ทำชุดทดลอง	5	5	5	3	5	4.60	0.89	ดีมาก
6. ความสะดวกในการดูแลรักษา	4	5	5	4	5	4.60	0.55	ดีมาก
7. ความสะดวกในการเตรียมการทดลอง	4	5	4	4	5	4.40	0.55	ดี
8. ความเหมาะสมกับระดับผู้เรียน	5	5	5	4	4	4.60	0.55	ดีมาก
9. สะดวกและใช้งานง่าย	5	5	4	3	5	4.40	0.89	ดี
10.ความสัมพันธ์ของชุดทดลองกับใบงาทดลอง	5	5	3	4	5	4.40	0.89	ดี
11. ความปลอดภัยขณะทำการทดลอง	5	5	4	3	5	4.40	0.89	ดี
12.คุณค่าของชุดทดลองทางวิชาการโดยภาพรวม	4	5	4	4	5	4.40	0.55	ดี
	รวม					4.50	0.68	ดีมาก

ตารางที่ จ.13 แสดงผลการวิเคราะห์คุณภาพของใบงานปฏิบัติการ ของทรงคุณวุฒิ

รายการประเมิน	ผู้ทรงคุณวุฒิ คนที่					ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับคุณภาพ
	1	2	3	4	5			
1. ความสมบูรณ์ของวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม	4	4	4	4	5	4.20	0.45	ดี
2. ความสอดคล้องระหว่างเนื้อหากับวัตถุประสงค์	5	5	4	4	5	4.60	0.55	ดีมาก
3. ปริมาณเนื้อหาในแต่ละหน่วย	5	4	5	3	5	4.40	0.89	ดี
4. ลำดับขั้นในการนำเสนอเนื้อหา	5	5	4	4	5	4.60	0.55	ดีมาก
5. ความถูกต้องของเนื้อหา	5	5	5	3	5	4.60	0.89	ดีมาก
6. ความเหมาะสมของเนื้อหากับระดับผู้เรียน	5	5	4	4	4	4.40	0.55	ดี
7. ความชัดเจนในการอธิบายเนื้อหา	5	5	4	4	5	4.60	0.55	ดีมาก
8. การเรียงลำดับเนื้อหาเหมาะสม	5	5	5	4	5	4.80	0.45	ดีมาก
9. ภาษาที่ใช้อ่านเข้าใจง่าย	5	4	4	4	4	4.20	0.45	ดี
10. การจัดรูปแบบใบงานเนื้อหาเหมาะสม	5	4	4	4	5	4.40	0.55	ดี
11. รูปภาพประกอบเนื้อหาสื่อความหมายได้ชัดเจน	5	5	3	4	5	4.40	0.89	ดี
12. รูปภาพประกอบมีขนาดเหมาะสม	5	3	3	4	5	4.00	1.00	ดี
	รวม					4.50	0.68	ดีมาก

ตารางที่ จ.14 แสดงผลการวิเคราะห์คุณภาพของแบบฝึกหัด ของทรงคุณวุฒิ

รายการประเมิน	ผู้ทรงคุณวุฒิ คนที่					ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับคุณภาพ
	1	2	3	4	5			
1. คำถามตรงตามวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม	4	5	4	3	5	4.20	0.84	ดี
2. แบบทดสอบคลอบคลุมวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม	5	4	5	3	5	4.40	0.89	ดีมาก
3. ข้อความกระชับเหมาะสม	4	4	4	4	5	4.20	0.45	ดี
4. ภาษาที่ใช้เข้าใจง่าย	4	4	4	4	5	4.20	0.45	ดี
5. จำนวนข้อเหมาะสมกับวัตถุประสงค์	5	5	5	3	5	4.60	0.89	ดีมาก
6. คำถามและตัวเลือกมีเป้าหมายชัดเจน	4	5	4	3	5	4.20	0.84	ดี
7. คำถามมีความยากง่ายเหมาะสม	4	4	4	4	4	4.00	0.00	ดี
8. คำถามมีความกระชับเหมาะสม	4	4	4	4	4	4.00	0.00	ดี
	รวม					4.23	0.54	ดี

ตารางที่ จ.15 แสดงคะแนนที่ได้จากการทดลองระหว่างเรียน ใบงานที่ 1

ข้อที่	น้ำหนัก	คนที่											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2
7	4	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
8	4	2	2	4	2	4	4	2	2	2	2	2	2
9	4	4	4	4	4	4	4	2	2	4	4	4	4
10	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
คะแนนที่ได้ (28)		22	24	26	23	26	26	22	22	24	24	23	24
คะแนนสอบ (10)		9	8	9	5	8	7	7	6	10	9	8	8
คะแนนรวม (38)		31	32	35	28	34	33	29	28	34	33	31	32

ตารางที่ จ.18 แสดงคะแนนที่ได้จากการทดลองระหว่างเรียน ใบงานที่ 4

ข้อที่	น้ำหนัก	คนที่											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
5	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2
6	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2
7	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2
8	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1
9	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	4	2	1	2	2	2	1	1	1	2	1	1	1
11	4	4	4	4	4	4	4	2	2	4	4	4	4
12	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
คะแนนที่ได้ (28)		26	24	24	24	27	26	21	19	23	26	26	25
คะแนนสอบ		7	7	10	6	8	9	6	8	7	7	8	7
คะแนนรวม (28)		33	31	34	30	35	35	27	27	30	33	34	32

ตารางที่ จ.19 แสดงคะแนนที่ได้จากแบบทดสอบรวมหลังการเรียน

คนที่	คะแนน		
	ใบงาน (28)	แบบทดสอบรวม (20)	สอบหลังการทดลอง (48)
1	22	20	42
2	22	18	40
3	22	19	41
4	20	18	38
5	22	20	42
6	23	20	43
7	20	17	37
8	18	18	36
9	20	18	38
10	20	17	37

ตารางที่ จ.19 แสดงคะแนนที่ได้จากแบบทดสอบรวมหลังการเรียน (ต่อ)

คนที่	คะแนน		
	ใบงาน (28)	แบบทดสอบรวม (20)	สอบหลังการทดลอง (48)
11	22	18	40
12	20	19	39

ภาคผนวก ฉ

คู่มือการใช้ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอสเบื้องต้น

คู่มือการใช้งาน

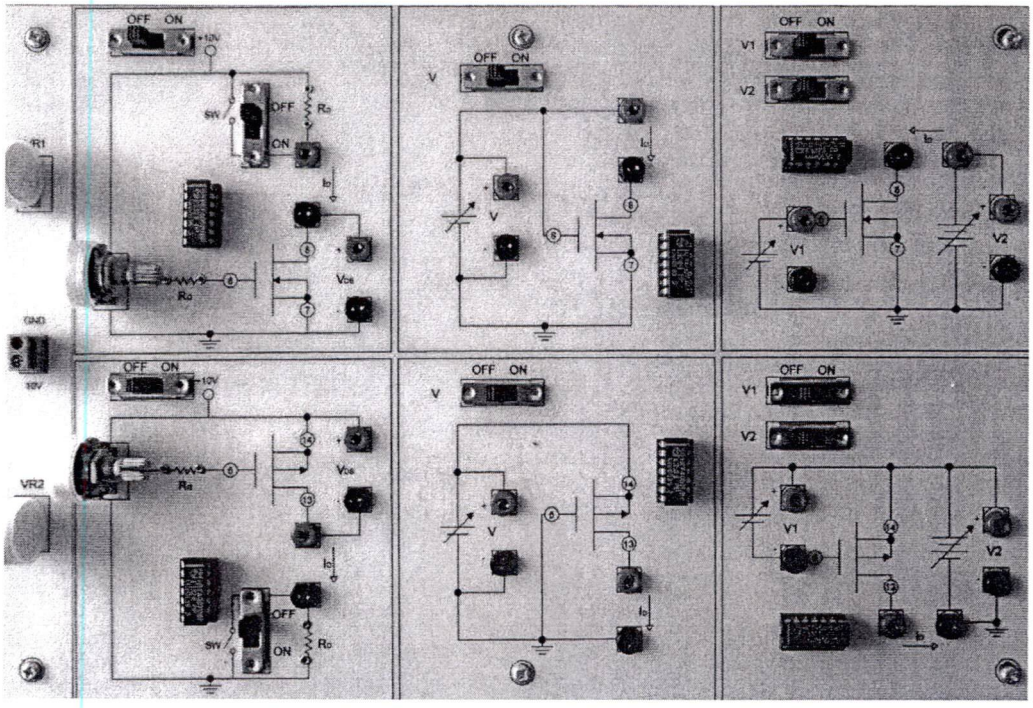
ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอสเบื้องต้น

อุปกรณ์ที่ต้องใช้ประกอบการทดลองมีดังนี้

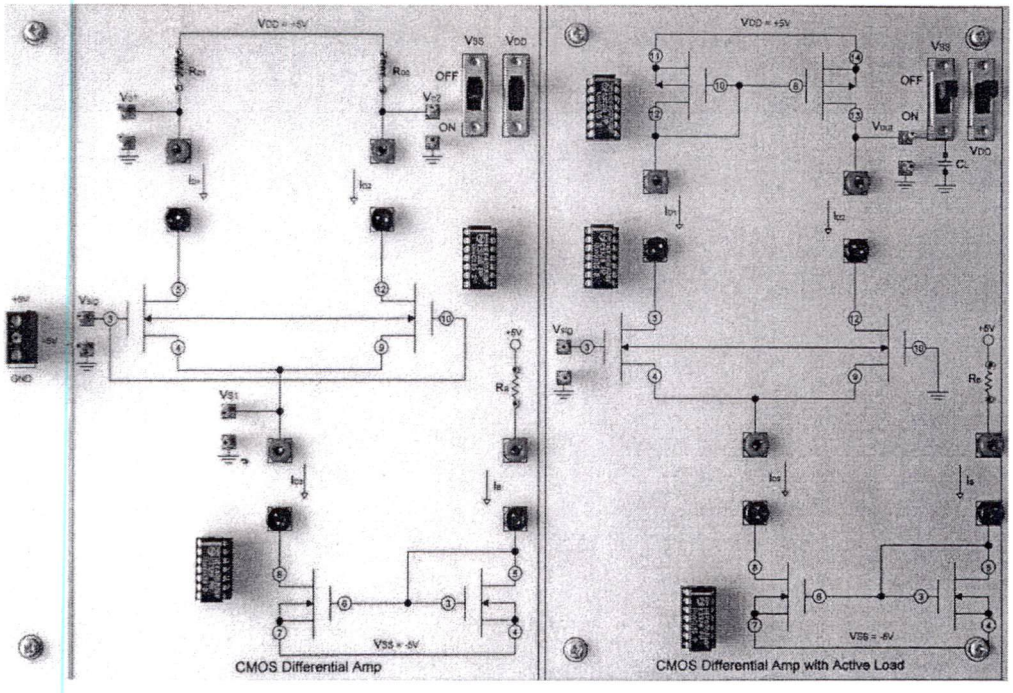
1. ชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอสเบื้องต้น
2. ใบงานทดลอง 4 ใบงาน
3. แบบทดสอบท้ายใบงานทดลอง
4. แบบทดสอบรวมหลังจากปฏิบัติการทดลองครบทั้ง 4 ใบแล้ว
5. Function Generator พร้อมสายสัญญาณ
6. Oscilloscope พร้อมสายสัญญาณ
7. มัลติมิเตอร์

ขั้นตอนการปฏิบัติการทดลอง

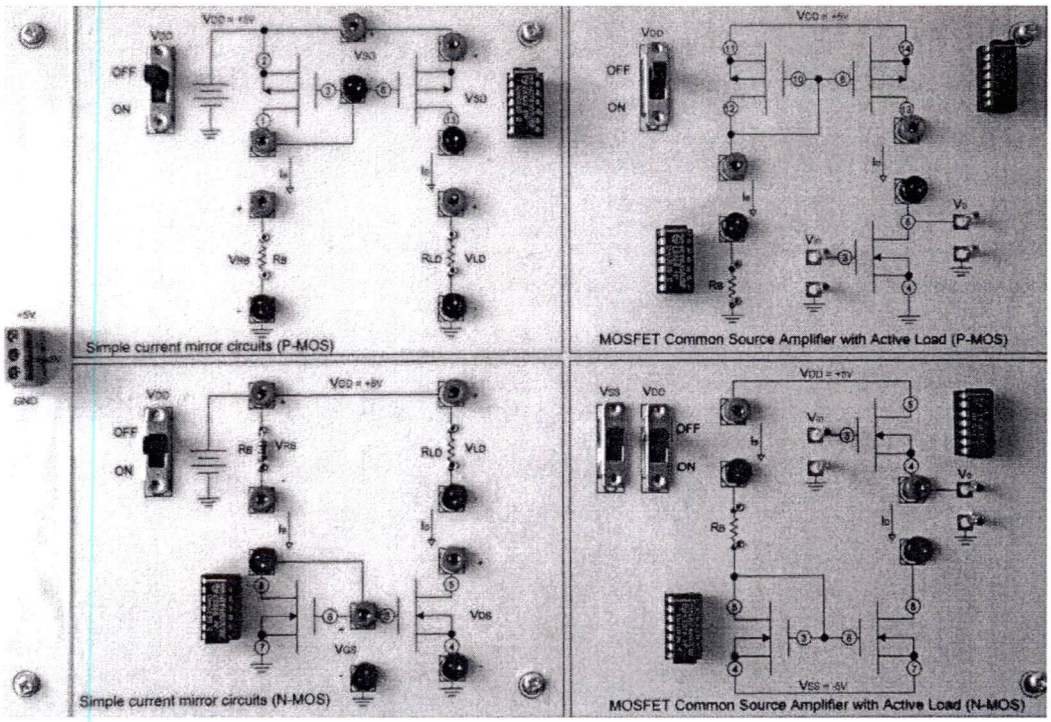
1. ให้นักศึกษาเตรียมอุปกรณ์ต่างๆ ตามใบงานทดลอง
2. ผู้วิจัยอธิบายถึงรายละเอียดต่างๆบนแผงชุดทดลอง และวัตถุประสงค์ ขั้นตอนการทดลอง รวมถึงวิธีการใช้เครื่องมือต่างๆประกอบการทดลอง
3. ให้นักศึกษาปฏิบัติตามขั้นตอนการทดลองตามใบงาน และวัดค่าต่างๆ เพื่อบันทึกผลที่ได้ลงในใบงานทดลอง
4. เมื่อปฏิบัติการทดลองครบในแต่ละใบงาน ให้นักศึกษาทำแบบทดสอบท้ายใบงานในแต่ละใบงานทั้ง 4 ใบงาน
5. เมื่อนักศึกษาทุกคนปฏิบัติการทดลองครบทั้ง 4 ใบงานแล้ว ให้นักศึกษาทำแบบทดสอบรวมพร้อม กันทั้งหมดอีกครั้ง



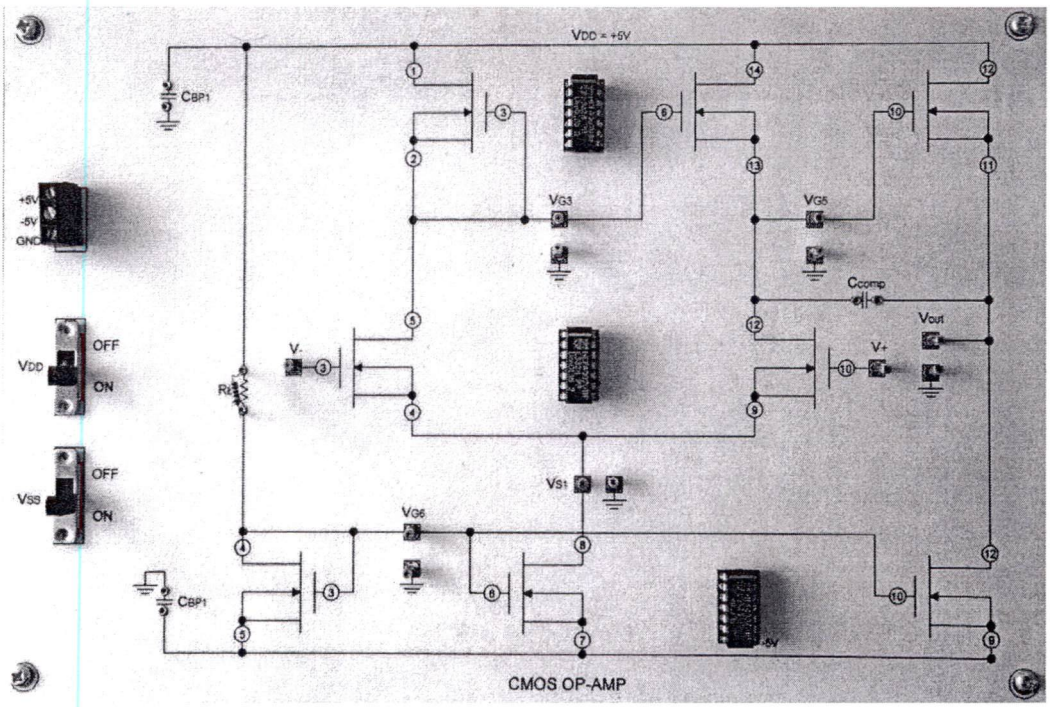
ก. แผงวงจรสำหรับการศึกษาคุณสมบัติของซีมอส



ข. แผงวงจรสำหรับการศึกษาแหล่งจ่ายกระแสและวงจรสะท้อนกระแส



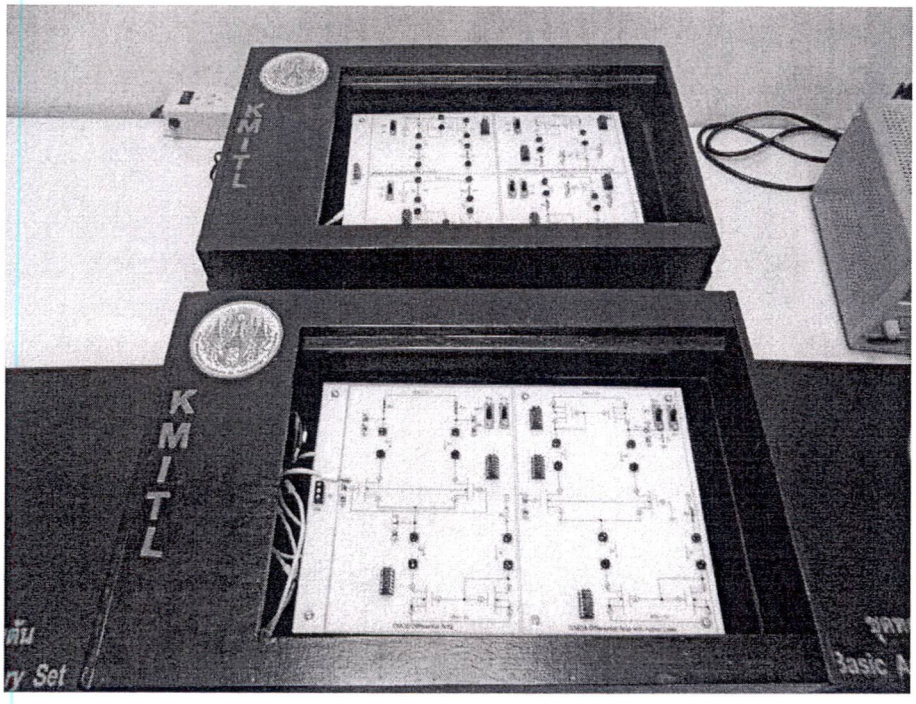
ค. แผงวงจรสำหรับศึกษาตัวขยายความแตกต่าง



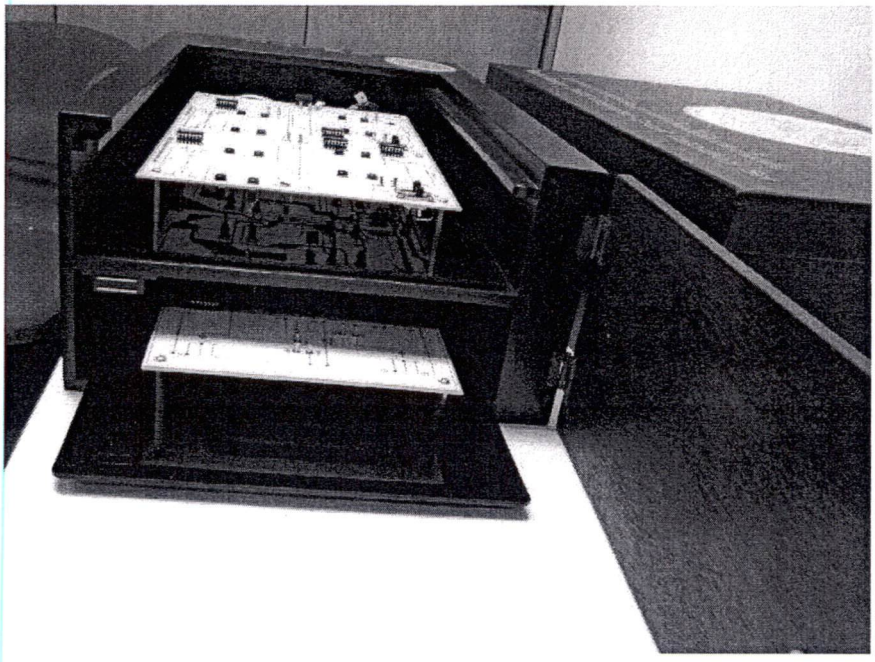
ง. แผงวงจรสำหรับศึกษาวงจรออปแอมป์สองภาค

รูปที่ ฉ.1 แสดงรูปภาพชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอสเบื้องต้น

ก. กล่องเก็บชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอสเบื้องต้น



ข. ด้านบนเมื่อเปิดฝากล่องเก็บชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอสเบื้องต้น



ค. ด้านขวาของกล่องเก็บชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอสเบื้องต้น

รูปที่ ฉ.2 แสดงรูปภาพกล่องเก็บชุดทดลองวงจรรวมแอนาลอกโดยใช้ซีมอสเบื้องต้น

จากรูป ฉ.2 (ก) แสดงภาพ ขณะที่ไม่ได้ใช้งาน เมื่อเปิดฝากล่องเก็บชุดทดลอง ด้านบนแสดงตามรูป ฉ. 2 (ข) ด้านขวาแสดงตามรูป ฉ.2 (ค) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีประตูสำหรับเปิด ด้านในมีการเก็บแผงวงจรทดลองถึง 2 ชั้น เมื่อต้องการทดลองแผงวงจรใด เพียงแค่ดึงออกมาสอดที่ร่องบนสุดและปิดประตูตามรูป

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายชาคริต โพธิ์บัว
วัน-เดือน-ปีเกิด	12 สิงหาคม 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดลพบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 470 หมู่ 9 ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000
สถานที่ทำงาน	วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี
ประวัติการศึกษา	ปีการศึกษา 2549 สำเร็จการศึกษา ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ.2549-พ.ศ.2550	ตำแหน่งครูพิเศษสอน แผนกวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ วิทยาลัยเทคนิคนครนายก
พ.ศ.2550-พ.ศ.2551	ตำแหน่งครูพิเศษสอน แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี
พ.ศ.2551-ปัจจุบัน	ตำแหน่งครูพิเศษสอน แผนกวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี