

การออกแบบวงจรวัดอุณหภูมิที่ใช้แรงดันต่ำและกินกำลังไฟต่ำ



นายโอมรินทร์ สาธุเสน

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

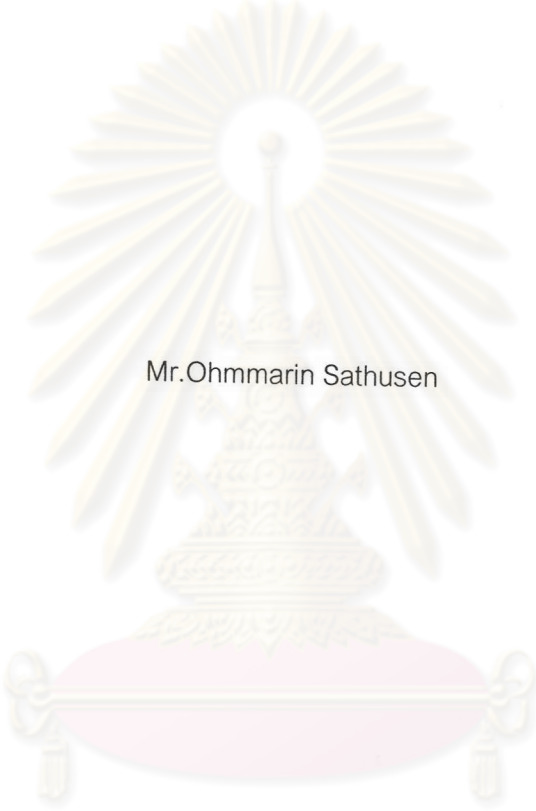
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1312-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A DESIGN OF A LOW VOLTAGE AND LOW POWER DIGITAL TEMPERATURE SENSOR



Mr.Ohmmarin Sathusen

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

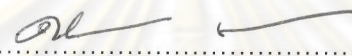
Chulalongkorn University

Academic Year 2004

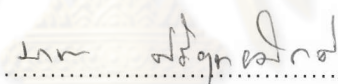
ISBN 974-53-1312-2

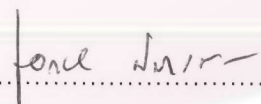
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบวงจรวัดอุณหภูมิที่ใช้แรงดันต่ำและกินกำลังไฟต่ำ
โดย นายโอมรินทร์ สาธุเสน
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัมย์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัยวุฒิ วงษ์โคเมท


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัญศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัมย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัยวุฒิ วงษ์โคเมท)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม ปิรา)

โอมรินทร์ สารุเสน : การออกแบบวงจรวัดอุณหภูมิที่ใช้แรงดันต่ำและกินกำลังไฟต่ำ.
(A DESIGN OF A LOW VOLTAGE AND LOW POWER DIGITAL TEMPERATURE
SENSOR) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. เอกชัย ลีลาวัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.
นัยวุฒิ วงษ์โคเมท, 87 หน้า. ISBN 974-53-1312-2.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบวงจรวัดอุณหภูมิที่ใช้แรงดันต่ำ และกินกำลังไฟต่ำ ที่มีช่วงอุณหภูมิในการวัดตั้งแต่ -40 ถึง 120 องศาเซลเซียส การออกแบบอาศัยหลักการผลต่าง ช่องว่างพลังงานของซิลิคอนเพื่อสร้างกระแสที่แปรผันตามอุณหภูมิ หรือกระแสพีแทต ส่วนประกอบของวงจรแบ่งย่อยออกได้เป็น 3 ส่วน คือ วงจรวัดอุณหภูมิและสร้างกระแสอ้างอิง ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบซิกมาเดลต้า และวงจรรควบคุมภาคดิจิทัล วงจรรวมนี้จะถูกนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบระบุเอกลักษณ์ด้วยคลื่นวิทยุ (RFID) ทำให้สามารถวัดแบบไร้สายได้ วงจรต้นแบบออกแบบด้วยเทคโนโลยีซีมอส 0.35 ไมโครเมตร มีพื้นที่ชิปรวมทั้งแพดสำหรับทดสอบประมาณ 0.4 ตารางมิลลิเมตร ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วงจรสามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟเลี้ยงตั้งแต่ 2 ถึง 3.3 โวลต์ และมีความละเอียด 10 บิต หรือประมาณ 0.19 องศาเซลเซียส วงจรดังกล่าวกินกำลังทางไฟฟ้าเฉลี่ย 20.45 ไมโครวัตต์ ที่แรงดันไฟเลี้ยง 2.4 โวลต์และอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส เมื่อใช้งานร่วมกับชิป RFID ความละเอียดลดลงจะเหลือ 8 บิต หรือประมาณ 0.76 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพราะผลของสัญญาณรบกวนจากซัสเตรทของวงจร และระดับแรงดันไฟเลี้ยงภายในชิป โดยหลังการเปรียบเทียบแบบหนึ่งจุดค่าความผิดพลาดมีค่าไม่เกิน 2 องศาเซลเซียส ในช่วงการวัด 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา..... 2547.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4670619721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : TEMPERATURE SENSOR / PTAT CURRENT SOURCE / SIGMA-DELTA
ADC / RFID

OHMMARIN SATHUSEN : A DESIGN OF A LOW VOLTAGE AND LOW POWER
DIGITAL TEMPERATURE SENSOR . THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.
EKACHAI LEELARASMEE, Ph.D. THESIS COADVISOR : ASST.PROF.
NAIYAVUDHI WONGKOMET, Ph.D., 87 pp. ISBN 974-53-1312-2.

This thesis presents a design of a low-voltage and low-power digital temperature sensor with a measurement range of -40°C to 120°C . A temperature sensor is derived from a PTAT current source. The circuit is composed of three major blocks: a temperature sensor with reference current source, a first order sigma delta analog to digital converter and a digital circuit controller. The circuit is integrated into an RFID microchip, allowing wireless measurement. The prototype circuit, designed with a $0.35\text{-}\mu\text{m}$ CMOS technology, has the chip area, including pads, of 0.4mm^2 . Experimental results show that the circuit can operate from 2 to 3.3V supply voltage and has a resolution of 10 bits or 0.19°C . The circuit consumes average power up to $20.45\mu\text{W}$ at 2.4V power supply and at 27°C . When operating with RFID microchip, the resolution is reduced to 8 bits or 0.76°C , due to substrate noise and power supply level in a microchip. After the one point calibration, the measurement error is less than 2°C in a measurement range 0°C to 100°C .

Department... Electrical Engineering... Student's signature Ohmmarin Sathusen
Field of study... Electrical Engineering... Advisor's signature Ekaek L
Academic year... 2004... Co-advisor's signature Chit W/ast.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รศ.ดร.เอกชัย ลีลารัมย์ และ ดร. นัยวุฒิ วงษ์โคเมท อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ บริษัท ซิลิคอน คราฟต์ เทคโนโลยี จำกัด ที่เชื้อเพื่อโปรแกรมให้ใช้งานสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการนำวงจรที่ได้ออกแบบไปเจือสาร ขอขอบคุณ พี่ๆ ที่บริษัท ซิลิคอน คราฟต์ เทคโนโลยี จำกัด ที่สอนการใช้โปรแกรมต่างๆ ให้คำปรึกษาในการออกแบบวงจร ตลอดจนเชื้อเพื่ออุปกรณ์ในการทดสอบวงจรรวม

นอกจากนี้ยังมีเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัยออกแบบและประยุกต์ วงจรรวม (IDAR) ที่คอยห่วงใย ให้ช่วยเหลือตลอดจนคำแนะนำที่ดีต่างๆ มาโดยตลอด

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ซึ่งให้ความอนุเคราะห์มอบเงินทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อฉลองในวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรง เจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา

ทำยนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และพี่ชายที่ให้การสนับสนุนด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

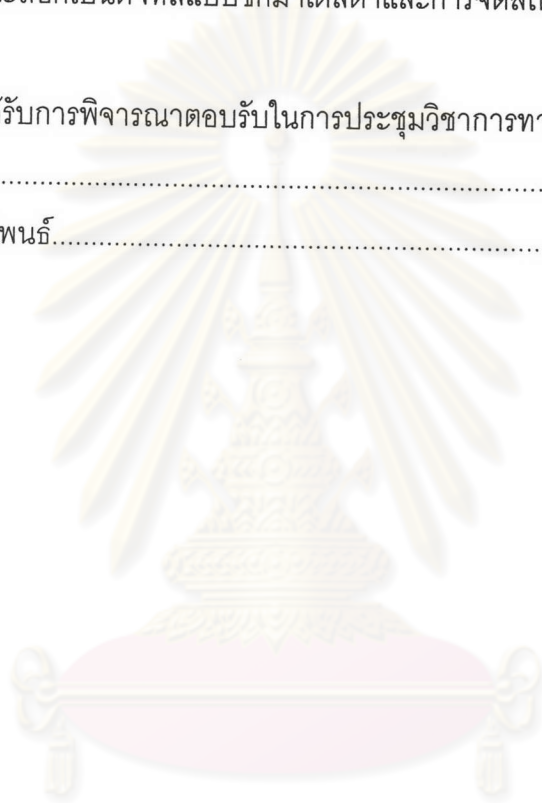
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	3
บทที่ 2 วงจรวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอลและการทำงานร่วมกับระบบ RFID	4
2.1 ปรีทรวศน์วรรณกรรม.....	4
2.2 ภาพรวมของวงจรวัดอุณหภูมิ.....	6
2.3 วงจรวัดอุณหภูมิและสร้างสัญญาณอ้างอิง.....	6
2.3.1 แรงดันผลต่างช่องว่างพลังงานและกระแสพีแทต.....	7
2.3.2 กระแสอ้างอิง.....	9
2.4 ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอล.....	10
2.4.1 ตัวแปลงแบบดูอัลสโลป (Dual Slope ADC).....	11
2.4.2 ตัวแปลงแบบซิกมาเดลต้า (Sigma-Delta ADC).....	12
2.5 วงจรควบคุมภาคดิจิตอล.....	14
2.6 การทำงานของวงจรวัดอุณหภูมิร่วมกับ RFID.....	15
2.7 สรุปท้ายบท.....	16
บทที่ 3 การออกแบบและผลจำลองการทำงาน	17
3.1 ความไม่เป็นอุดมคติ (Non-ideality).....	17
3.1.1 ความไม่เข้าคู่ของทรานซิสเตอร์แบบมอส.....	18

3.1.2	ความไม่เข้าคู่ของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ.....	19
3.1.3	ความไม่เข้าคู่ของทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์.....	19
3.1.4	ความคลาดเคลื่อนของแรงดันเบสอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์.....	20
3.1.5	ความไม่เป็นเชิงเส้นของกระแสอ้างอิง.....	20
3.2	การปรับเทียบ (Calibration).....	21
3.2.1	การปรับเทียบหนึ่งจุด.....	22
3.2.2	การปรับเทียบสองจุด.....	23
3.3	วงจรวัดอุณหภูมิและวงจรสร้างกระแสอ้างอิง.....	24
3.3.1	การสตาร์ทอัพวงจร.....	24
3.3.2	วงจรสร้างกระแสที่แปรผันตามอุณหภูมิและกระแสอ้างอิง.....	26
3.3.3	วงจรชดเชยความโค้งของกระแสอ้างอิง.....	29
3.3.4	ผลของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวต้านทาน.....	31
3.3.5	วงจรสร้างแรงดันใหม่คร่อมสำหรับตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอล.....	33
3.3.6	การหยุดการทำงานของวงจร.....	34
3.4	ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอลแบบซิกมาเดลต้า (Sigma-Delta ADC).....	35
3.4.1	ออปแอมป์และตัวเก็บประจุสำหรับการอินทิเกรต.....	37
3.4.2	ตัวเปรียบเทียบระดับแรงดัน.....	41
3.5	วงจรควบคุมภาคดิจิตอล.....	44
3.6	การจำลองการทำงานทั้งระบบ.....	47
3.7	สรุปท้ายบท.....	51
บทที่ 4	การวัดลายวงจรรวม.....	53
4.1	วงจรวัดอุณหภูมิและสร้างกระแสอ้างอิง.....	53
4.2	ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอล.....	56
4.3	วงจรควบคุมภาคดิจิตอล.....	56
4.4	การกำหนดแพดและการวางแพด (Pad).....	56
4.5	การวัดลายวงจรรวม.....	57
4.6	สรุปท้ายบท.....	59
บทที่ 5	การทดสอบวงจรรวม.....	60
5.1	การทดสอบวงจรวัดอุณหภูมิที่ทำงานเป็นอิสระ.....	60
5.2	การทดสอบวงจรรวมวัดอุณหภูมิที่ทำงานร่วมกับชิป RFID.....	67
5.3	สรุปท้ายบท.....	70

บทที่ 6	ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ.....	71
6.1	ข้อสรุป.....	71
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	72
	รายการอ้างอิง.....	74
	ภาคผนวก.....	77
	ภาคผนวก ก	
	ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบซิกมาเดลต้าและการจัดสรรฐานสัญญาณรบกวน.....	78
	ภาคผนวก ข	
	บทความที่ได้รับการพิจารณาตอบรับในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า	
	ครั้งที่ 27.....	82
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	87



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 งานวิจัยที่ได้มีมาก่อนเกี่ยวกับการวัดอุณหภูมิ.....	5
ตารางที่ 2-2 วงจรรวมวัดอุณหภูมิที่มีจำหน่ายทั่วไป	5
ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติของตัวต้านทานแต่ละชนิด.....	31
ตารางที่ 3-2 ขนาดของทรานซิสเตอร์ภายในวงจรออปแอมป์	38
ตารางที่ 3-3 ผลการจำลองการทำงานของออปแอมป์	40
ตารางที่ 3-4 ขนาดของทรานซิสเตอร์ภายในตัวเปรียบเทียบระดับแรงดัน.....	42
ตารางที่ 3-5 เวลาในการเปรียบเทียบของตัวเปรียบเทียบที่ผลต่างแรงดันขาเข้าค่าต่างๆ.....	42
ตารางที่ 3-6 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะความแปรปรวนต่างๆ	49
ตารางที่ 4-1 รายละเอียดและหน้าที่ของแพตสำหรับทดสอบวงจร.....	57
ตารางที่ 5-1 ผลการวัดอุณหภูมิโดยตรงจากวงจรรวมที่ทำงานเป็นอิสระ	64
ตารางที่ 5-2 ผลการวัดอุณหภูมิและกระแสที่แรงดันไฟเลี้ยงต่างๆ.....	66
ตารางที่ 5-3 ผลการวัดอุณหภูมิของวงจรรวมวัดอุณหภูมิภายในชิป RFID.....	68

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 ส่วนประกอบของวงจรวัดอุณหภูมิ	6
รูปที่ 2-2 วงจรสร้างแรงดันผลต่างช่องว่างพลังงาน	7
รูปที่ 2-3 วงจรสร้างกระแสที่แปรผันตามอุณหภูมิหรือกระแสพีแทต.....	8
รูปที่ 2-4 วงจรสร้างกระแสอ้างอิงจากกระแส I_{PTAT} และ I_{VBE}	9
รูปที่ 2-5 วงจรสร้างกระแสที่แปรผันตามแรงดันคร่อมเบสกับอิมิตเตอร์ (I_{VBE}).....	9
รูปที่ 2-6 วงจรของตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบดูอัลสโลป.....	11
รูปที่ 2-7 สัญญาณเชิงเวลาของแรงดันขาออกอินทิเกรเตอร์ ที่กระแสขาเข้าค่าต่างๆกัน	12
รูปที่ 2-8 การทำงานของตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบซิกมาเดลต้าอันดับหนึ่ง	12
รูปที่ 2-9 สัญญาณเชิงเวลาของแรงดันภายในมอดูเลเตอร์แบบซิกมาเดลต้า	13
รูปที่ 2-10 ส่วนประกอบของระบบ RFID ที่มีวงจรวัดอุณหภูมิอยู่ในชิป RFID.....	16
รูปที่ 3-1 วงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้น	18
รูปที่ 3-2 ความผิดพลาดของข้อมูลขาออกเนื่องจากสาเหตุต่างๆ.....	21
รูปที่ 3-3 ลักษณะการเปรียบเทียบแบบหนึ่งจุดซึ่งเสมือนเป็นการหักล้างค่าออฟเซตกับที่วัดได้.....	22
รูปที่ 3-4 ลักษณะการเปรียบเทียบแบบสองจุดซึ่งเสมือนการสร้างเส้นตรงขึ้นมาใหม่เพื่อวัดค่า.....	22
รูปที่ 3-5 ขั้นตอนการเปรียบเทียบโดยใช้เทคโนโลยี RFID	23
รูปที่ 3-6 วงจรสำหรับการสตาร์ทอัพ	24
รูปที่ 3-7 ผลการจำลองขณะสตาร์ทอัพวงจร.....	25
รูปที่ 3-8 วงจรสร้างกระแสขาออกที่มีค่าแปรผันตามอุณหภูมิ	26
รูปที่ 3-9 สัญญาณกระแสต่างๆในวงจรสร้างกระแสที่แปรผันตามอุณหภูมิและกระแสอ้างอิง	28
รูปที่ 3-10 วงจรชดเชยความโค้งของกระแสอ้างอิงแบบเชิงเส้นเป็นช่วงๆ	29
รูปที่ 3-11 กระแสต่างๆในวงจรชดเชยความโค้งของกระแสอ้างอิง.....	30
รูปที่ 3-12 กระแสอ้างอิงก่อนและหลังทำการชดเชยความโค้งด้วยวิธีชดเชยเชิงเส้นเป็นช่วงๆ.....	30
รูปที่ 3-13 อัตราส่วนของกระแส I_{TEMP} / I_{REF} และค่าของกระแสเมื่อรวมผลของสัมประสิทธิ์ เชิงอุณหภูมิของตัวต้านทาน	32
รูปที่ 3-14 วงจรสร้างแรงดันโหมตร่วมเพื่อป้องกันให้กับตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล	33
รูปที่ 3-15 ระดับแรงดันโหมตร่วม(V_{CM}) ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	33
รูปที่ 3-16 วงจรหยุดการทำงานของวงจรสร้างกระแสโดยแยกตามชนิดของทรานซิสเตอร์	34
รูปที่ 3-17 วงจรวัดอุณหภูมิและสร้างกระแสอ้างอิง (ไม่รวมส่วนของวงจรสร้างแรงดันโหมตร่วม).....	35

รูปที่ 3-18 ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบซิกมาเดลต้าอันดับหนึ่ง.....	36
รูปที่ 3-19 สัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล	36
รูปที่ 3-20 สัญญาณภายในวงจรมอดูเลเตอร์ขณะทำการแปลงค่า	36
รูปที่ 3-21 วงจรอปแอมป์โครงสร้างขยายขึ้นเดียวแบบสะท้อนกระแส	38
รูปที่ 3-22 แบบจำลองของมอดูเลเตอร์แบบซิกมาเดลต้าเมื่อมีผลของค่าทรานคอนดักแตนซ์	39
รูปที่ 3-23 โครงสร้างของวงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันแบบพลวัต	41
รูปที่ 3-24 ผลการจำลองการทำงานของวงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันในช่วงเปรียบเทียบโดย ค่าผลต่างของแรงดันขาเข้ามีค่า 1mV	43
รูปที่ 3-25 ผลการจำลองการทำงานของวงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันทั้งหมด	43
รูปที่ 3-26 ผลการจำลองการทำงานของมอดูเลเตอร์เมื่อป้อนสัญญาณกระแสขาเข้าเป็น สัญญาณไซน์ความถี่ 400 Hz	44
รูปที่ 3-27 ผลการวิเคราะห์เชิงความถี่ของสัญญาณพัลส์ขาออกจากมอดูเลเตอร์	44
รูปที่ 3-28 ส่วนประกอบของวงจรควบคุมภาคดิจิทัล	45
รูปที่ 3-29 แผนภาพการขึ้นตอนการทำงานของวงจรซึ่งถูกควบคุมโดยวงจรควบคุมภาคดิจิทัล	45
รูปที่ 3-30 ผลจำลองการทำงานของวงจรดิจิทัล (ช่วงของการเริ่มต้นการทำงาน)	47
รูปที่ 3-31 ผลจำลองการทำงานของวงจรดิจิทัล (ช่วงของการหยุดการทำงานและแสดงผล)	47
รูปที่ 3-32 ผลจำลองการทำงานของวงจรวัดอุณหภูมิร่วมกับตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ที่อุณหภูมิ -40 °C	48
รูปที่ 3-33 ผลจำลองการทำงานของวงจรวัดอุณหภูมิร่วมกับตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ที่อุณหภูมิ 27 °C	50
รูปที่ 3-34 ผลการจำลองการทำงานของวงจรวัดอุณหภูมิร่วมกับตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ที่อุณหภูมิ 120 °C	50
รูปที่ 3-35 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าดิจิทัลขาออกที่อ่านค่าได้จากค่าเต็มสเกล ขนาด 12 บิตซึ่งเมื่อเทียบเป็นเลขฐานสิบจะมีค่า 4096	50
รูปที่ 4-1 ลายวงจรของวงจรสร้างกระแสที่แปรผันตามอุณหภูมิและกระแสอ้างอิง	54
รูปที่ 4-2 ลายวงจรของตัวต้านทานแบบผสม	55
รูปที่ 4-3 ลายวงจรของตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบซิกมาเดลต้า	55
รูปที่ 4-4 ลายวงจรของวงจรควบคุมภาคดิจิทัล	55
รูปที่ 4-5 ลายวงจรรวมของวงจรวัดอุณหภูมิ	58
รูปที่ 5-1 วงจรสำหรับทดสอบวงจรรวมวัดอุณหภูมิ	61

รูปที่ 5-2 ลายวงจรถงแผ่นพีซีบีสำหรับทดสอบวงจรรวม.....	61
รูปที่ 5-3 ลักษณะของสัญญาณ conv_en และ dout	62
รูปที่ 5-4 ลักษณะของสัญญาณ conv_en และ dout ในขณะที่ทำการเลื่อนบิตข้อมูลออกมา	62
รูปที่ 5-5 ค่าความผิดพลาดของวงจรวัดอุณหภูมิเมื่อทำการวัดโดยตรงก่อนปรับเทียบ	65
รูปที่ 5-6 ค่าความผิดพลาดของวงจรวัดอุณหภูมิเมื่อทำการวัดโดยตรงหลังปรับเทียบ แบบหนึ่งจุด	65
รูปที่ 5-7 ระบบทดสอบการวัดอุณหภูมิซึ่งอยู่ในชิป RFID	67
รูปที่ 5-8 ค่าความผิดพลาดของวงจรวัดอุณหภูมิเมื่อทำการวัดผ่านชิป RFID	69
รูปที่ 5-9 ค่าความผิดพลาดของวงจรวัดอุณหภูมิเมื่อทำการวัดผ่านชิป RFID หลังปรับเทียบ แบบหนึ่งจุด	69



 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย