บทที่ 1

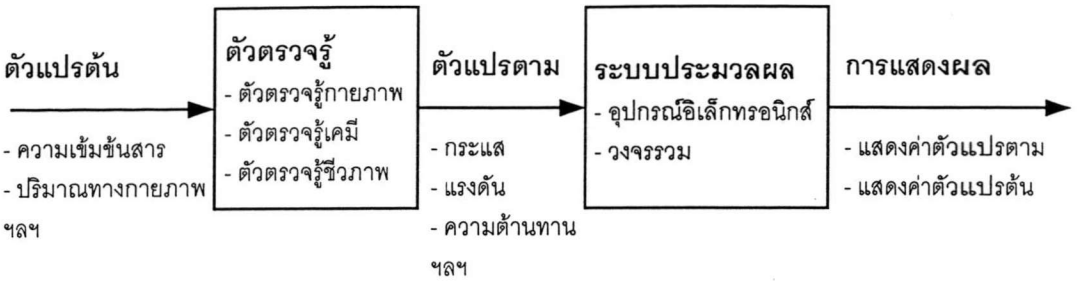
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การวัดในปัจจุบันมีแนวโน้มที่พึ่งพาการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มากขึ้น จากในอดีตซึ่งเครื่องมือวัดอาศัยหลักการทางกลศาสตร์ หรือการวัดซึ่งต้องใช้กระบวนการซับซ้อนดังที่ทำในห้องปฏิบัติการ เมื่อตัวตรวจรู้ (Sensor) ซึ่งสามารถเปลี่ยนปริมาณที่ต้องการวัดให้อยู่ในรูปสัญญาณไฟฟ้าถูกค้นพบ อุปกรณ์วัดที่ใช้หลักการทางไฟฟ้าก็ถูกคิดค้นขึ้น จากตอนแรกเป็นระบบแอนะล็อก (Analog) พัฒนามาสู่ระบบดิจิทัล (Digital) ในที่สุด เครื่องมือวัดที่ใช้หลักการทางไฟฟ้านั้นมีขนาดเล็กกว่าเครื่องมือวัดที่อาศัยหลักการทางกลศาสตร์ ราคาถูก ใช้งานสะดวกกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการวัดในห้องปฏิบัติการ เมื่อมีระบบดิจิทัลเข้ามาช่วย ยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับเครื่องมือวัดได้มากขึ้น ลดภาระงานที่ผู้ใช้ต้องทำลงไปได้มาก ทุกวันนี้เราจึงเห็นเครื่องมือวัดที่ใช้หลักการทางไฟฟ้าได้ทั่วไปโดยเฉพาะเครื่องมือที่มีการแสดงผลและจัดเก็บข้อมูลแบบดิจิทัล

เครื่องมือวัดนั้นประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญสองตัวคือ ตัวตรวจรู้ และระบบประมวลผลดังรูปที่ 1-1 ตัวตรวจรู้มีหน้าที่แปลงปริมาณที่ต้องการวัด หรือเรียกว่าตัวแปรต้น ซึ่งอาจอยู่ในรูปความเข้มข้นของสารละลายหรือปริมาณทางกายภาพ อย่างเช่น ความเข้มแสง ให้อยู่ในรูปแบบที่ระบบประมวลผลซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถนำไปประมวลได้ ตัวแปรตามซึ่งเป็นสัญญาณออกที่ได้จากตัวตรวจรู้นั้นอาจอยู่ในรูปกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า หรือการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ระบบประมวลผลจะนำค่าตัวแปรตามที่ได้มาตีความ เพื่อแสดงผลให้ผู้ใช้ทราบค่าของตัวแปรต้นที่ต้องการวัดได้ ในบางครั้งผู้ใช้อาจต้องการทราบค่าของตัวแปรตามแทนที่จะเป็นตัวแปรต้น เพราะทราบค่าตัวแปรต้นมาก่อนแล้ว เช่น กรณีที่ต้องการหาลักษณะถ่ายโอนของตัวตรวจรู้ เป็นต้น

ตัวตรวจรู้อาจแบ่งตามประเภทของสิ่งที่วัดได้สามแบบ คือ ตัวตรวจรู้ทางกายภาพ (Physical sensor) ตัวตรวจทางรู้เคมี (Chemical sensor) และตัวตรวจรู้ทางชีวภาพ (Biosensor) [1] ตัวตรวจรู้ทางกายภาพจะแปลงปริมาณทางกายภาพ อย่างเช่น มวล อุณหภูมิ ความเข้มแสง ฯลฯ ให้อยู่ในรูปปริมาณทางไฟฟ้า ส่วนตัวตรวจรู้ทางเคมี และตัวตรวจรู้ทางชีวภาพมีหน้าที่



รูปที่ 1-1 แผนภาพบล็อกแสดงองค์ประกอบของเครื่องมือวัดที่ใช้หลักการทางไฟฟ้า

คล้ายกัน คือ แปลงความเข้มข้นของสารเคมีหรือชีวภาพให้อยู่ในรูปปริมาณทางไฟฟ้า ความแตกต่างระหว่างสารเคมีกับสารชีวภาพคือโครงสร้าง และลักษณะสมบัติของสารชีวภาพนั้นจะซับซ้อนกว่า

ช่วงทศวรรษที่ผ่านมามนุษย์ให้ความสนใจกับสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมากขึ้น สิ่งนี้ทำให้ตัวตรวจรู้ทางชีวภาพถูกประดิษฐ์คิดค้นอย่างแพร่หลาย เพื่อนำไปใช้งานในด้านที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม เช่น การตรวจวินิจฉัยโรคทางการแพทย์ การศึกษาและวิจัยทางการเกษตร การควบคุมกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพ การศึกษาสภาพแวดล้อม ฯลฯ [1] ตัวตรวจรู้ทางชีวภาพที่ได้รับความสนใจมากชนิดหนึ่ง คือ ตัวตรวจรู้ที่ให้สัญญาณออกในรูปกระแสไฟฟ้า หรือ ตัวตรวจรู้แอมเพอโรเมตริก (Amperometric sensor) เนื่องจากตัวตรวจรู้ชนิดนี้มีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณออกต่อปริมาณที่วัด หรือลักษณะถ่ายโอน (Transfer characteristic) เป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถวัดความเข้มข้นของสารชีวภาพได้สะดวก ถ้ารู้ความชันของกราฟลักษณะถ่ายโอน หรือความไว (Sensitivity) ของตัวตรวจรู้ ตัวอย่างของตัวตรวจรู้ชนิดนี้ ได้แก่ ตัวตรวจรู้น้ำตาลกลูโคส (Glucose sensor) ตัวตรวจรู้แอลกอฮอล์ (Alcohol sensor) ตัวตรวจรู้ออกซิเจน (Oxygen sensor) และตัวตรวจรู้ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride sensor) เป็นต้น โดยเฉพาะตัวตรวจรู้น้ำตาลกลูโคสนั้นเป็นส่วนประกอบสำคัญในเครื่องมือวัดน้ำตาลกลูโคส ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ขณะนี้อยู่ในความสนใจของนักวิจัย ที่พยายามพัฒนาให้เครื่องมือนี้มีขนาดเล็ก ใช้งานง่าย และน่าเชื่อถือ [2] เพื่อใช้ทดแทนกระบวนการวัดแบบเก่าที่ยุ่งยาก ใช้เวลา และมีผลข้างเคียงต่อผู้ป่วยโรคเบาหวาน

นอกจากตัวตรวจรู้ทางชีวภาพที่กล่าวมาแล้ว ยังมีตัวตรวจรู้ทางเคมีบางชนิดที่ให้สัญญาณออกในรูปกระแสไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นตัวตรวจรู้ซึ่งวัดสารเคมีที่อยู่ในรูปสารละลายหรือแก๊ส อย่างเช่น ตัวตรวจรู้สารละลายโลหะหนักอย่างแคดเมียม ตะกั่ว และทองแดง [3] หรือตัวตรวจรู้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO sensor) และโอโซน (O_3) [4] เป็นต้น ตัวตรวจรู้ทางเคมีเหล่านี้มักถูกจัดว่าเป็นตัวตรวจรู้แอมเพอโรเมตริกเหมือนอย่างตัวตรวจรู้น้ำตาลกลูโคส นอกจากนี้

โฟโตไดโอด (Photodiode) และโฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor) ซึ่งเป็นตัวตรวจรู้ทางกายภาพก็ให้สัญญาณออกในรูปของกระแสเช่นกัน ในที่นี้จะเรียกรวมตัวตรวจรู้ซึ่งให้สัญญาณออกเป็นกระแสไฟฟ้าทุกชนิดว่าตัวตรวจรู้แบบให้กระแสออก (Current-output sensor)

จะเห็นได้ว่าตัวตรวจรู้แบบให้กระแสออกนั้นมีมากมายหลายชนิด การออกแบบวงจรระบบประมวลผลเพื่อใช้วัดกระแสจากตัวตรวจรู้ประเภทนี้ จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวตรวจรู้ที่ใช้ การประยุกต์ใช้งานของวงจรนี้ ได้แก่ การวัดน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วยโรคเบาหวาน การวัดปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ และการวัดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศ เป็นต้น ทั้งนี้วงจรวัดจะต้องมีความยืดหยุ่น สามารถใช้งานร่วมกับตัวตรวจรู้หลายชนิดที่มีพิสัยของกระแสออกแตกต่างกันได้

ระบบประมวลผลในรูปที่ 1-1 ทำหน้าที่วัดปริมาณทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวแปรตามที่ได้จากตัวตรวจรู้ ถึงแม้ว่าระบบจะไม่ได้วัดตัวแปรต้นโดยตรง แต่ถ้าลักษณะถ่ายโอนของตัวตรวจรู้นั้นสามารถกำหนดได้แน่นอน เช่น ลักษณะถ่ายโอนแบบเชิงเส้น ระบบประมวลผลสามารถจะนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าของตัวแปรต้นอีกต่อหนึ่งได้ แต่เดิมระบบที่ใช้ในการประมวลผลสร้างขึ้นจากวัสดุอิเล็กทรอนิกส์หลายๆ ชิ้นมาประกอบกันบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board, PCB) วิธีนี้ทำให้เครื่องมือวัดมีขนาดใหญ่และใช้กำลังงานสูง จึงไม่เหมาะเป็นอุปกรณ์พกพา ข้อจำกัดนี้เป็นแรงจูงใจในการออกแบบระบบประมวลผลด้วยเทคโนโลยีวงจรรวม ซึ่งเป็นการรวมวัสดุอิเล็กทรอนิกส์หลายๆ ชิ้นเข้าไว้ในอุปกรณ์เพียงชิ้นเดียว ส่งผลให้เครื่องมือวัดมีขนาดเล็กและใช้กำลังงานน้อยลง เทคโนโลยีของวงจรรวมที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเทคโนโลยีซีมอส (CMOS) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย

เทคโนโลยีวงจรรวมยังเอื้ออำนวยต่อการผลิตไมโครเซนเซอร์ (Microsensor) ซึ่งเป็นตัวตรวจรู้ขนาดเล็กมากที่สร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีวงจรรวม และไมโครเซนเซอร์สามารถสร้างบนกระบวนการผลิตแบบซีมอสได้ โดยทำกระบวนการไมโครแมชชีน (Micromachined procedure) ภายหลังจากกระบวนการผลิตหลักเสร็จสิ้น [5] เมื่อนำไมโครเซนเซอร์มารวมกับระบบประมวลผลบนชิปเดียวกันจะสามารถสร้างระบบวัดขนาดจิ๋วที่สามารถปลูก (implant) ลงในสิ่งมีชีวิต หรือใช้ในอุปกรณ์วัดที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ เนื่องจากไมโครเซนเซอร์มีขนาดเล็กมากจึงสามารถสร้างไมโครเซนเซอร์หลายๆ ตัวในชิปเดียว เพื่อใช้วัดปริมาณหลายๆ อย่างพร้อมกัน [6] สิ่งเหล่านี้เป็นแนวโน้มของตัวตรวจรู้ในอนาคต อย่างไรก็ตามวงจรที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้มุ่งเน้นให้ใช้งานกับไมโครเซนเซอร์ แต่มุ่งให้ใช้งานกับตัวตรวจรู้ทั่วๆ ไปที่อยู่ภายนอกชิป

การสร้างระบบประมวลผลให้กับตัวตรวจรู้แบบให้กระแสออก นอกจากจะได้ประโยชน์โดยตรงจากการนำไปใช้งานแล้ว ยังเป็นการสนับสนุนการผลิตตัวตรวจรู้ชนิดนี้ในทางอ้อม ตัวอย่างเช่น ตัวตรวจรู้น้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตขึ้นได้เองในประเทศไทย [7] ก่อนหน้านี้เคยมีการออกแบบระบบประมวลลักษณะนี้มาแล้ว [8] แต่ระบบดังกล่าวยังมีขอบเขตการใช้งานที่จำกัด เช่น ไม่เหมาะกับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง ใช้งานกับตัวตรวจรู้ได้เพียงชนิดเดียว รวมทั้งยังทำงานได้ไม่สมบูรณ์ งานวิจัยนี้จึงเน้นการออกแบบระบบที่แก้ปัญหาข้อจำกัดต่างๆ ของระบบแบบเดิม เพื่อให้ได้วงจรที่เหมาะสำหรับนำไปใช้งานจริงยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบระบบประมวลผล ซึ่งแปลงสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้รับจากตัวตรวจรู้ให้อยู่ในรูปของตัวเลขบนจอผลึกเหลว โดยมุ่งความสนใจไปที่ตัวตรวจรู้แอมเพอโรเมตริก และขยายขีดความสามารถของระบบให้ครอบคลุมถึงตัวตรวจรู้ชนิดอื่นๆ ที่มีสัญญาณออกเป็นกระแสด้วย นอกจากนี้วงจรยังมีระบบปรับเทียบเพื่อให้แปลงค่าจากตัวตรวจรู้ได้อย่างถูกต้อง วงจรที่ออกแบบมีจุดเด่นอยู่ที่การรวมส่วนประกอบหลักที่จำเป็นไว้ในชิป จึงลดพื้นที่ที่ต้องใช้บนแผ่นวงจรพิมพ์ และวงจรสามารถทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยงต่ำ และกินกำลังงานต่ำพอที่จะทำงานโดยใช้แบตเตอรี่ขนาด 1.5V จำนวน 2-3 ก้อนได้

วงจรรวมที่เสร็จสมบูรณ์แล้วสามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์วัดแบบพกพาที่มีขนาดเล็กได้ โดยต้องการส่วนประกอบเพิ่มเติมเพียงเล็กน้อย ได้แก่ ตัวต้านทานหนึ่งตัว ตัวเก็บประจุหนึ่งตัว และวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาวิธีการออกแบบวงจรรวมซีมอส (CMOS)
2. ออกแบบวงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกจากตัวตรวจรู้แบบให้กระแสออกทั่วไป เพื่อแสดงผลทางจอผลึกเหลว
3. ออกแบบวงจรรวมที่ใช้แรงดันต่ำและกินกำลังงานต่ำสำหรับทำหน้าที่ดังกล่าว

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ออกแบบวงจรสำหรับแปลงสัญญาณกระแสจากตัวตรวจรู้แบบให้กระแสออก ไปเป็นตัวเลขบนจอผลึกเหลวเจ็ดส่วน โดยใช้เทคโนโลยี 0.7 ไมครอน ของบริษัทอัลคาเทลไมโคร-อิเล็กทรอนิกส์ โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- แสดงผลบนหน้าจอแบบผลึกเหลว 3½ หลัก

- ใช้ได้กับตัวตรวจรู้น้ำตาลกลูโคส ตัวตรวจรู้ออกซิเจน และตัวตรวจรู้แบบให้กระแส-ออกชนิดอื่นๆ
- วงจรมีระบบปรับเทียบออฟเซตและความไวของตัวตรวจรู้
- วงจรสามารถทำงานได้แม้ในสภาวะที่อุณหภูมิห้องมีการเปลี่ยนแปลง
- แรงดันแหล่งจ่ายเปลี่ยนแปลงได้ระหว่าง 2 – 5 โวลต์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำวงจรที่ออกแบบไปประกอบกับตัวตรวจรู้แบบให้กระแสออก เพื่อสร้างเครื่องมือวัดแบบพกพา อันจะเป็นประโยชน์ในทางการแพทย์ และวิทยาศาสตร์
2. ความรู้ที่ได้จากการออกแบบสามารถนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบวงจรรวมอื่นๆ ต่อไป

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเทคนิคการออกแบบวงจรรวมแอนะล็อก และหาข้อมูลจากแหล่งอ้างอิง
2. กำหนดคุณสมบัติที่ต้องการของวงจรในแต่ละส่วนโดยคร่าวๆ
3. ออกแบบและจำลองการทำงานของวงจรแต่ละส่วนแยกจากกัน เช่น วงจรบัฟเฟอร์กระแส ออปแอมป์ ตัวเปรียบเทียบ และวงจรไบแอส เป็นต้น
4. ออกแบบส่วนควบคุมการทำงานซึ่งเป็นวงจรดิจิทัล
5. จำลองการทำงานของวงจรรวมทั้งหมด
6. เขียนแบบลายวงจรรวม
7. ออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับทดสอบวงจรรวม
8. ทดสอบ และวัดผลการทำงานของวงจรรวมต้นแบบ
9. สรุป และเขียนวิทยานิพนธ์

1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็นห้าบท บทที่สองกล่าวถึงคุณสมบัติทั่วไปของตัวตรวจรู้แบบให้กระแสออก และระบบประมวลผลแบบต่างๆ ที่ใช้งานร่วมกับตัวตรวจรู้ เนื้อหาในบทยังกล่าวถึงข้อดีและข้อเสียของโครงสร้างวงจรแบบต่างๆ เพื่อใช้เป็นเหตุผลในการตัดสินใจเลือกวงจรที่ใช้ในการออกแบบจริง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่สามกล่าวถึงรายละเอียดของการออกแบบและผังวงจรของวงจรแต่ละส่วนในระดับทรานซิสเตอร์ ข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นในการออกแบบ ความไม่เป็นอุดมคติของวงจรรวม รวมทั้งผลการจำลองการทำงานของวงจรที่ได้ออกแบบไว้

บทที่สี่กล่าวถึงการวาดลายวงจรรวมเพื่อนำไปเจือสารเป็นวงจรรวมต้นแบบ การจัดตำแหน่งของวงจรส่วนต่างๆ บนลายวงจรรวม การกำหนดขาสัญญาณที่ต่อออกภายนอกชิป รายละเอียดของขาสัญญาณแต่ละขา นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับทดสอบวงจรรวมต้นแบบ

บทที่ห้านำเสนอขั้นตอนในการทดสอบวงจร และผลการวัดคุณสมบัติของวงจรเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ออกแบบไว้ และบทสุดท้ายจึงสรุปผลที่ได้จากการวิจัย และเสนอแนะข้อคิดเห็นที่อาจเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวงจรต่อไปในอนาคต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย