# บทที่ 4

# การวาดลายวงจรรวม

เมื่อได้ออกแบบวงจรให้สามารถทำงานได้ตามที่กำหนดแล้ว ขั้นต่อไปในการออกแบบคือการนำวงจรที่ได้ออกแบบไว้มาเขียนเป็นลายวงจร เพื่อส่งลายวงจรดังกล่าวให้กับทางโรงงานเจือสารเพื่อทำการผลิตวงจรรวมต่อไป การวาดลายวงจรทำโดยใช้โปรแกรมเวอร์ทัวโซ (Virtuoso) ลายวงจรที่วาดนั้นจะต้องไม่ขัดกับข้อกำหนดของโรงงาน โดยสามารถตรวจสอบได้โดยกระบวนการดีอาร์ซี (DRC หรือ Design Rule Check) หลังจากการวาดลายวงจรเสร็จสิ้นแล้วจะต้องทำการตรวจสอบลายวงจรโดยการสกัด (Extract) ข้อมูลจากลายวงจรมาเป็นอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ ตัวเก็บประจุ ตลอดจนโหนดต่างๆของวงจร จากนั้นจึงนำไปเปรียบเทียบกับผังวงจร (Schematic) ที่ได้ออกแบบ โดยเรียกกระบวนการนี้ว่าแอลวีเอส (LVS หรือ Layout Versus Schematic) ซึ่งเมื่อตรวจสอบเรียบร้อยแล้วจึงส่งข้อมูลผังวงจรทั้งหมดให้กับโรงงานเจือสารต่อไป

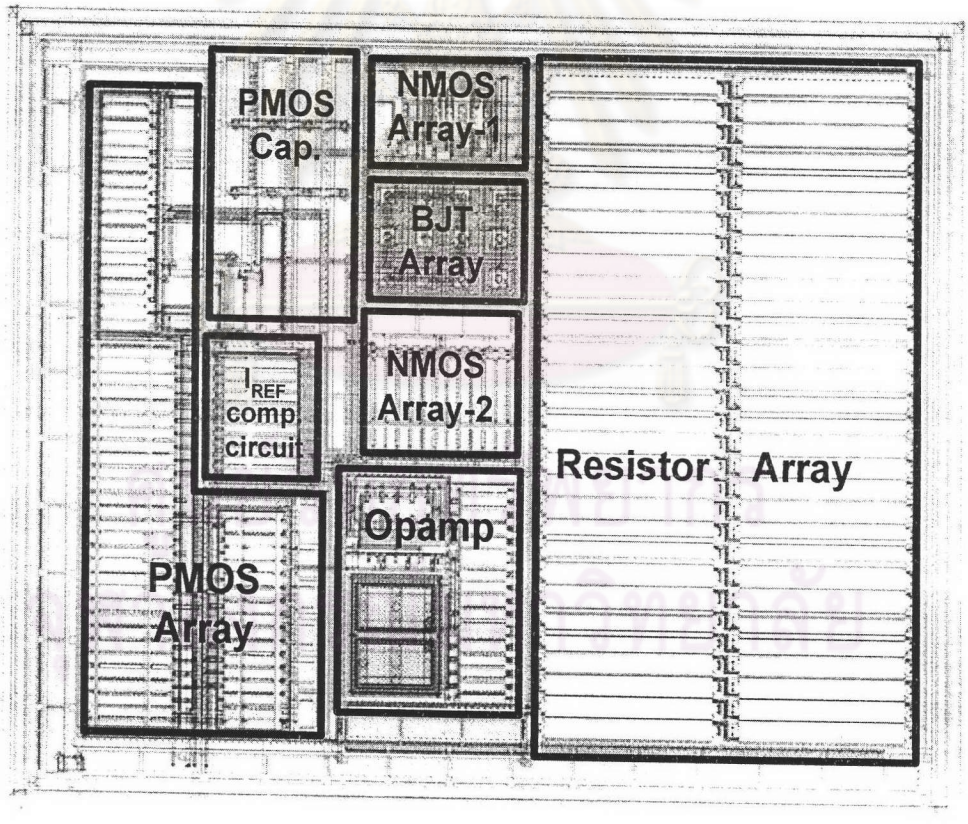
รายละเอียดของการวาดลายวงจรสามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วนหลักๆ เช่นเดียวกับการออกแบบวงจร ได้แก่ ส่วนของวงจรสร้างกระแสที่แปรผันตามอุณหภูมิและกระแสอ้างอิง ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบซิกมาเดลต้า และส่วนของวงจรควบคุมภาคดิจิทัล การวาดลายวงจรในสองส่วนแรกจะทำการวาดด้วยมือทั้งหมด ส่วนภาคดิจิทัลจะวาดโดยใช้กระบวนการสร้างลายวงจรอัตโนมัติที่เรียกว่าเอสพีอาร์ (SPR หรือ Standard-Cell Place & Route) นอกจากวงจรทั้งสามส่วนแล้ว ยังได้ทำการออกแบบเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการรับกระแสขาเข้าจากภายนอกเพื่อป้อนให้กับตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลโดยตรง

## 4.1 วงจรวัดอุณหภูมิและสร้างกระแสอ้างอิง

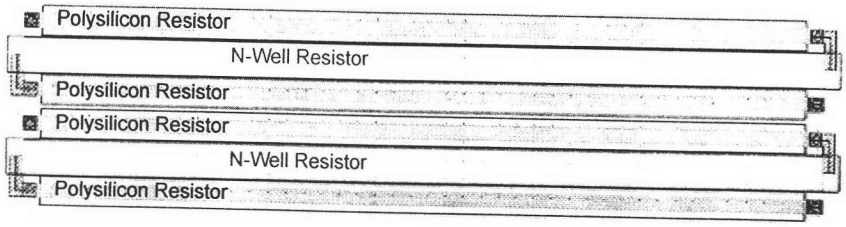
วงจรสร้างกระแสซึ่งมีลายวงจรดังรูปที่ 4-1 ซึ่งภายในลายวงจรจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ คือ กลุ่มของทรานซิสเตอร์เอ็นมอส กลุ่มของทรานซิสเตอร์พีมอส วงจรสำหรับชดเชยความโค้งของกระแสอ้างอิง กลุ่มของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ กลุ่มของตัวต้านทาน และออปแอมป์สำหรับแปลงแรงดันตกคร่อมเบสกับอิมิตเตอร์เป็นกระแส และกลุ่มทรานซิสเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ โดยหลักการวางตำแหน่งของอุปกรณ์จะยึดหลักการทั่วไป [16] เช่น เทคนิคเซนทรอยด์ร่วม (Common Centroid) และเทคนิคการใช้อุปกรณ์หุ่น (Dummy Device) ในการวาดลายวงจรในส่วนนี้จำเป็นต้องให้อุปกรณ์เข้าคู่กันค่อนข้างสูง เนื่องจากจะส่งผลโดยตรงต่อความ

แม่นยำของกระแสขาออก ทั้งกระแสที่แปรผันตามอุณหภูมิและกระสแอ้างอิง อุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ เช่น ทรานซิสเตอร์หรือตัวต้านทานจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นย่อยๆ เพื่อให้ได้ความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

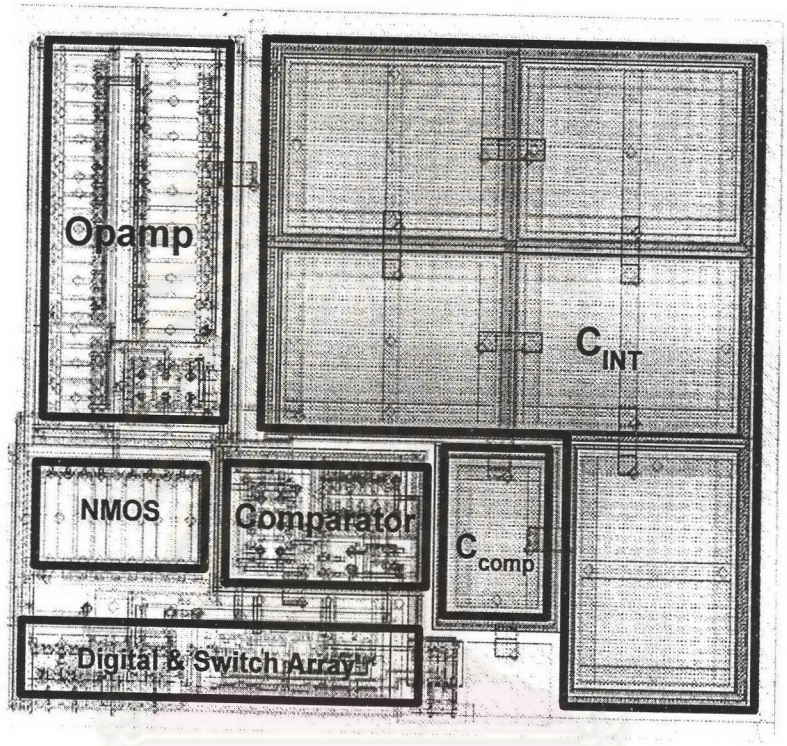
สำหรับกลุ่มของตัวต้านทานนั้น ตัวต้านทานที่ใช้จะประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ 2 ชนิดคือ ตัวต้านทานแบบหลุมชนิดเอ็น (N-Well Resistor) และตัวต้านทานแบบโพลีซิลิคอน (Polysilicon Resistor) ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.3.4 โดยมีลักษณะลายวงจรดังรูปที่ 4-2 ภายในรูปประกอบด้วยตัวต้านทาน 2 หน่วย แต่ละหน่วยมีตัวต้านทานแบบหลุมชนิดเอ็น 1 ตัว และแบบโพลีซิลิคอน 2 ตัว โดยที่ตัวต้านทานแบบหลุมชนิดเอ็นมีค่าความต้านทานต่อพื้นที่สูงสุด แต่ในการวาดลายวงจรนั้น จะต้องทำการเว้นที่ระหว่างตัวต้านทานชนิดเดียวกันเป็นระยะห่างขั้นต่ำ 2.2 $\mu$m ซึ่งถ้าใช้ตัวต้านทานแบบนี้ชนิดเดียวจะทำให้เสียพื้นที่ในการวาดลายวงจรมาก ดังนั้นจึงทำการเพิ่มตัวต้านทานแบบโพลีซิลิคอนลงไป 2 ตัว ที่ช่องว่างระหว่างตัวต้านทานแบบหลุมชนิดเอ็นแต่ละตัว ทำให้สามารถลดพื้นที่การวางลายวงจรได้



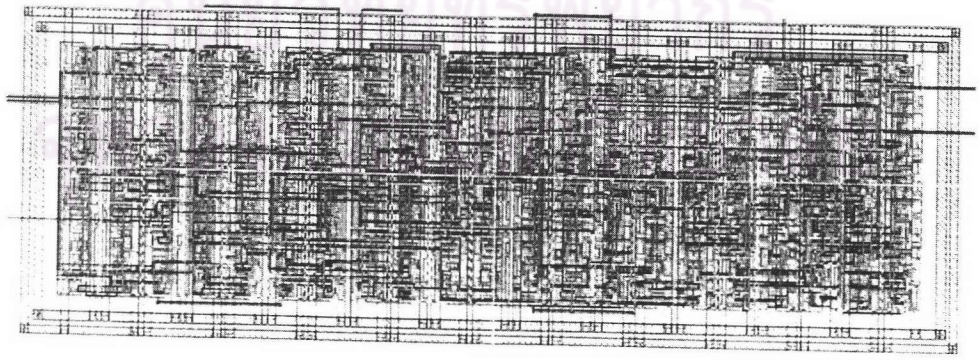

*รูปที่ 4-1 ลายวงจรของวงจรสร้างกระแสที่แปรผันตามอุณหภูมิและกระแสอ้างอิง*




*รูปที่ 4-2 ลายวงจรของตัวต้านทานแบบผสม*




*รูปที่ 4-3 ลายวงจรของตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบซิกมาเดลต้า*



*รูปที่ 4-4 ลายวงจรของวงจรควบคุมภาคดิจิทัล*

## 4.2 ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบซิกมาเดลต้าอันดับหนึ่งมีลายวงจรดังรูปที่ 4-3 โดยที่มีองค์ประกอบคือ ออปแอมป์ ตัวเก็บประจุขนาด 11.2 pF สำหรับตัวอินทิเกรเตอร์ ตัวเก็บประจุขนาด 1.2 pF สำหรับชดเชยผลทางความถี่ของออปแอมป์ วงจรเปรียบเทียบระดับแรงดัน วงจรไบแอส ซึ่งรับกระแสจากวงจรสร้างกระแสแล้วนำไปสะท้อนกระแสใช้ในส่วนต่างๆของวงจร และส่วนของแผงสวิตซ์และวงจรดิจิทัลเบื้องต้น ในการวาดต้องใช้ความระมัดระวังกับสายสัญญาณนาฬิกา ซึ่งใช้ควบคุมการทำงานตัวเปรียบเทียบระดับแรงดันและวงจรดิจิทัลเบื้องต้น ไม่ให้พาดผ่านหรืออยู่ใกล้วงจรแอนะล็อก ส่วนของออปแอมป์และวงจรไบแอสควรจะมีตัวคอนแทกต์สำหรับซับสเตรท (Substrate Contact) ล้อมรอบ เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากตัวซับสเตรทให้น้อยที่สุด สำหรับตัวเก็บประจุสำหรับการอินทิเกรตนั้นในการวาดได้แบ่งออกเป็น 5 ตัว เพื่อความสะดวกในการจัดลายวงจรและให้ค่าความเก็บประจุที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

## 4.3 วงจรควบคุมภาคดิจิทัล

การวาดลายวงจรควบคุมภาคดิจิทัลจะต่างจากวงจรในสองส่วนแรกที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งทำโดยการกำหนดโหนดต่างๆของวงจรควบคุมภาคดิจิทัล แล้วส่งโหนดเหล่านั้นให้โปรแกรมสำหรับวาดสร้างเป็นลายวงจรขึ้นมาโดยใช้กระบวนการเอสพีอาร์ โดยลายวงจรที่สร้างขึ้นโดยอัตโนมัติมีลักษณะดังรูปที่ 4-4

## 4.4 การกำหนดแพดและการวางแพด (Pad)

เมื่อสร้างลายวงจรรวมแล้ว จะต้องสร้างแพดเพื่อใช้เชื่อมต่อระหว่างวงจรรวมกับลวดเชื่อม ซึ่งจะนำสัญญาณผ่านเข้า-ออกมาภายนอกชิป สำหรับวงจรวัดอุณหภูมินี้ได้กำหนดแพดที่ใช้ทดสอบจำนวน 9 แพด ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของแพดออกเป็น 4 ประเภทด้วยกัน คือ

1. แพดสำหรับสัญญาณดิจิทัลขาเข้า แพดชนิดนี้ใช้สำหรับนำสัญญาณดิจิทัลภายนอกเข้าสู่ชิปเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงาน ภายในประกอบด้วยวงจรไดโอดสำหรับป้องกันไฟฟ้าสถิตหรืออีเอสดี (ESD, Electro-Static Discharge) และวงจรขับ (driver) โดยในสภาวะปกติ แพดชนิดนี้จะถูกต่อลงกราวน์โดยใช้ตัวต้านทานที่มีขนาดใหญ่

2. แพดสำหรับสัญญาณดิจิทัลขาออก แพดชนิดนี้ใช้สำหรับนำสัญญาณดิจิทัลจากชิปออกสู่ภายนอก โดยที่กำหนดให้เป็นแพดแบบเดรนเปิด (Open Drain) กล่าวคือ ถ้า

ต้องการวัดค่าสัญญาณดิจิทัล จะต้องนำตัวต้านทานมาต่อที่ขาออกด้วย ภายในแพดประกอบด้วยไดโอดป้องกันอีเอสดี และวงจรขับออกสู่ภายนอก

3. แพดสำหรับสัญญาณแอนะล็อก แพดนี้ใช้สำหรับการต่อสัญญาณแอนะล็อกขาเข้าจากภายนอกโดยตรง ซึ่งใช้ในกรณีที่ต้องการทดสอบตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล หรือไม่ต้องการวัดอุณหภูมิ ภายในประกอบด้วยวงจรไดโอดป้องกันอีเอสดี

4. แพดจ่ายกำลัง ใช้สำหรับต่อแหล่งจ่ายแรงดันให้กับวงจร

นอกจากนี้ยังมีแพดอีกชนิดคือ แพดกราวนด์ แต่เนื่องจากวงจรวัดอุณหภูมินี้จะถูกนำไปเจือสาร โดยเป็นส่วนประกอบหนึ่งของวงจรสำหรับ RFID ของบริษัทซิลิคอน คราฟต์ เทคโนโลยี จำกัด ดังนั้นจึงสามารถใช้แพดกราวนด์ร่วมกับส่วนอื่นๆได้ เพื่อเป็นการประหยัดพื้นที่ในการวาดลายวงจรรวมทั้งหมด สำหรับรายละเอียดและหน้าที่ของแพดแต่ละแพดเป็นดังตารางที่ 4-1

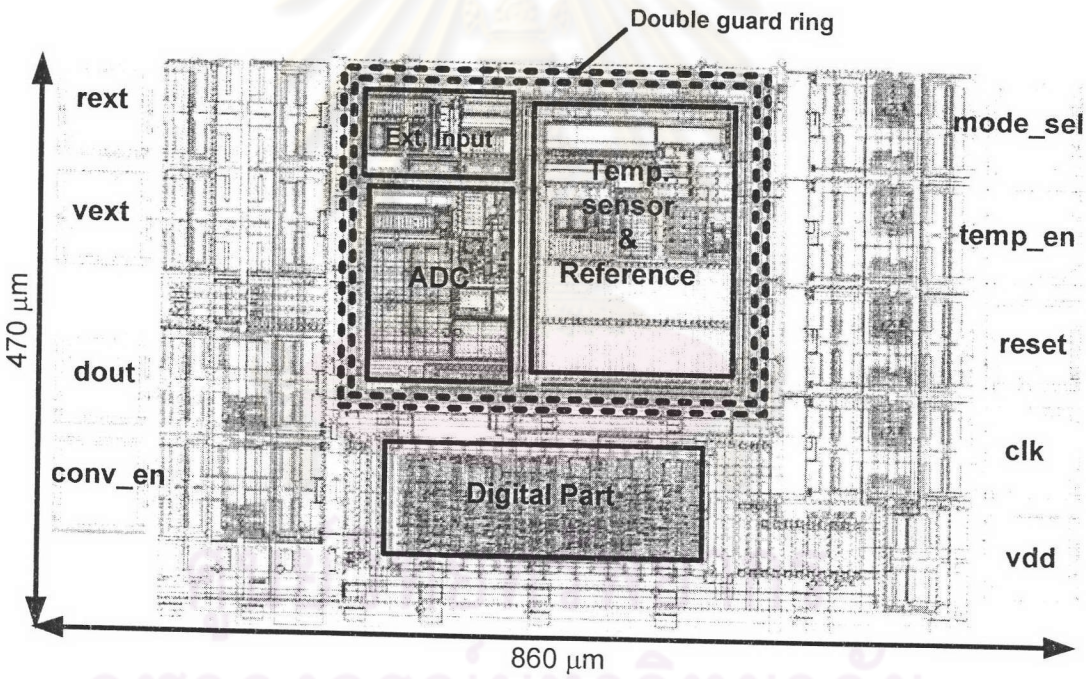
*ตารางที่ 4-1 รายละเอียดและหน้าที่ของแพดสำหรับทดสอบวงจร*

| ชื่อแพด | ชนิด | หน้าที่ |
|---|---|---|
| vdd | จ่ายกำลัง | ต่อแหล่งจ่ายแรงดันให้กับวงจร |
| dout | ดิจิทัลขาออก | ส่งสัญญาณพัลส์ขาออกของตัวแปลงและสัญญาณข้อมูลที่ถูกนับแล้วออกมาภายนอก |
| conv_en | ดิจิทัลขาออก | ระบุช่วงที่ใช้ในการแปลงค่า |
| mode_sel | ดิจิทัลขาเข้า | เลือกโหมดการทำงาน ระหว่างการวัดอุณหภูมิ และการรับแรงดันจากภายนอกโดยตรง |
| temp_en | ดิจิทัลขาเข้า | การระบุให้วงจรทำการวัดอุณหภูมิ |
| reset | ดิจิทัลขาเข้า | รีเซตการทำงานเบื้องต้นของวงจรทั้งหมด |
| clk | ดิจิทัลขาเข้า | สัญญาณนาฬิกาของวงจร |
| vext | แอนะล็อก | ต่อกับแรงดันภายนอกสำหรับการแปลงเป็นกระแส |
| rext | แอนะล็อก | ต่อกับตัวต้านทานภายนอกเพื่อใช้แปลงเป็นกระแส |

## 4.5 การวาดลายวงจรรวม

เมื่อได้ลายวงจรส่วนต่างๆแล้ว จะต้องนำมารวมกันพร้อมกับเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่างส่วนต่างๆ โดยลายวงจรรวมทั้งหมดเป็นดังรูปที่ 4-5 โดยที่วงจรในส่วนของภาคแอนะล็อกซึ่งประกอบด้วย ส่วนของวงจรสร้างกระแสที่แปรผันตามอุณหภูมิ ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

และวงจรสำหรับรับสัญญาณจากภายนอกโดยตรงจะถูกวางไว้ใกล้ๆกัน โดยพยายามให้สายสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่างแต่ละส่วน มีระยะทางให้สั้นที่สุด และหลีกเลี่ยงการพาดผ่านกัน วงจรส่วนนี้จะถูกป้องกันสัญญาณรบกวนจากวงจรดิจิทัลผ่านทางตัวซับสเตรท โดยการวางการ์ดริงล้อมรอบ 2 ชั้น (Double guard ring) โดยที่ส่วนของการ์ดริงนั้น ชั้นในจะสร้างจากคอนแทกต์สำหรับตัวซับสเตรท (substrate contact) ชั้นนอกสร้างจากคอนแทกต์สำหรับหลุมชนิดเอ็น (N-well contact) สำหรับการวางตำแหน่งแพดนั้น แพด rext และ vext ถูกวางให้ใกล้กับส่วนของวงจรเพิ่มเติมสำหรับรับค่าจากภายนอก เนื่องจากเป็นแพดแอนะล็อก ซึ่งอาจถูกรบกวนได้ง่าย ขณะที่แพดชนิดอื่นๆ เป็นแพดดิจิทัลจึงไม่เกิดปัญหา ในเรื่องการรบกวนเพียงแต่ระวังไม่ให้สายสัญญาณดิจิทัลเข้าใกล้สายสัญญาณแอนะล็อกเท่านั้น โดยลายวงจรที่วาดมีพื้นที่ไม่รวมแพดประมาณ 0.16 $mm^2$ และเมื่อรวมแพดแล้วมีขนาดประมาณ 860$\mu$m×470$\mu$m หรือประมาณ 0.4 $mm^2$




*รูปที่ 4-5 ลายวงจรรวมของวงจรวัดอุณหภูมิ*

ลายวงจรวัดอุณหภูมินี้ ส่วนหนึ่งจะใช้ทดสอบโดยตรงผ่านทางแพดที่กำหนดนี้ไว้เพื่อทดสอบขั้นตอนการทำงาน ตลอดจนความแม่นยำของการวัด นอกจากนี้ยังนำวงจรวัดอุณหภูมิซึ่งมีลักษณะลายวงจรเดียวกันนี้ (ไม่รวมส่วนของวงจรควบคุมภาคดิจิทัลและแพดสำหรับทดสอบ) ไปรวมเป็นส่วนหนึ่งของชิป RFID เบอร์ SIC7960 เพื่อทดสอบอ่านค่าผ่านทางคลื่นวิทยุอีกด้วย

## 4.6 สรุปท้ายบท

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการวาดลายวงจรรวมต้นแบบ ส่วนของวงจรแอนะล็อกซึ่งประกอบวัดอุณหภูมิและตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลจะถูกวาดลายวงจรด้วยมือ (Custom Layout) ขณะที่วงจรควบคุมภาคดิจิทัลจะถูกวาดด้วยโปรแกรมช่วยในการสร้างลายอัตโนมัติ หลังจากนั้นจึงเอาส่วนทั้งหมดมารวมกัน และทำการวาดเชื่อมต่อด้วยมือ วงจรที่ได้ออกแบบประกอบด้วยแพดสำหรับทำการทดสอบทั้งหมด 9 แพด โดยวงจรที่วาดทั้งหมดมีขนาดรวมแพดประมาณ 0.4 $mm^2$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย