

บทที่ 2

วงจรวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัลและการทำงานร่วมกับระบบ RFID

2.1 ปรีทรรศน์วรรณกรรม

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิธีการวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล ซึ่งพบว่าสามารถทำได้หลายวิธี โดยแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป สำหรับวงจรรวมสำหรับวัดอุณหภูมินั้น วิธีที่นิยมในการวัดคือการวัดโดยอาศัยหลักการแรงดันผลต่างช่องว่างพลังงาน เนื่องจากให้ความเป็นเชิงเส้นสูง และมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล มีการนำเสนอไว้หลายงาน งานวิจัยของ Baker [4] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล โดยใช้หลักการสร้างกระแสจากแรงดันผลต่างช่องว่างพลังงาน แล้วนำไปผ่านตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบซิกมาเดลต้าอันดับหนึ่ง งานวิจัยของ Tuthill [5] ใช้หลักการที่แตกต่างกันออกไป โดยการใช้การสวิตช์กระแสและใช้ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบซาร์ (SAR, Successive Approximation Register) งานวิจัยของ Perjits [6] ได้นำเสนอการวัดอุณหภูมิด้วยวิธีเดียวกันกับของ Baker แต่ปรับปรุงใช้ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบซิกมาเดลต้าอันดับสอง และมีการทริม (trimming) ค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ ทำให้ได้ความละเอียดสูงขึ้น ข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2-1

เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญทางสภาพแวดล้อม นอกจากงานวิจัยที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ทางด้านบริษัทผู้ผลิตออกแบบวงจรรวมได้ทำการออกแบบวงจรรวมสำหรับวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัลออกมาจำหน่ายเป็นจำนวนมาก โดยแต่ละตัวจะมีลักษณะเด่นแตกต่างกันออกไป ดังตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ต่างๆดังตารางที่ 2-2

วิทยานิพนธ์นี้ทำการออกแบบวงจรรวมสำหรับวัดอุณหภูมิโดยอาศัยหลักการแรงดันผลต่างช่องว่างพลังงาน โดยสามารถใช้งานร่วมกับการทำงานของระบบ RFID ได้ ดังนั้นคุณสมบัติหลักของวงจรรวม คือจะต้องใช้กระแสต่ำและทำงานได้ที่แรงดันต่ำ โดยไม่ต้องการความแม่นยำสูงมากนัก ซึ่งงานวิจัยของ Baker [4] มีคุณสมบัติเด่นในเรื่องการกินกระแสต่ำ จึงเป็นลักษณะโครงสร้างที่เหมาะสมซึ่งวิทยานิพนธ์นี้สามารถนำไปทำการแก้ไข หรือปรับปรุงเพื่อให้เหมาะสมได้ตามต้องการ

ตารางที่ 2-1 งานวิจัยที่ได้มีมาก่อนเกี่ยวกับการวัดอุณหภูมิ

คุณสมบัติ	Baker 1996 [4]	Tuthill 1998 [5]	Pertijs 2003 [6]
ความผิดพลาด	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
ช่วงอุณหภูมิ	-40°C ถึง 120°C	-50°C ถึง 125°C	-50°C ถึง 120°C
ความละเอียด	8 บิต	10 บิต	14 บิต
กระแสขณะวัด	25 μA	1 mA	130 μA
แรงดันไฟเลี้ยง	2.2 ถึง 5 V	2.7 ถึง 5.5 V	2.7 ถึง 5.5 V
อัตราการวัด	50 ครั้งต่อวินาที	10 ครั้งต่อวินาที	10 ครั้งต่อวินาที
การปรับเทียบ	2 จุด	1 จุด	1 จุด
เทคโนโลยี	0.7 μm	0.6 μm	0.5 μm
พื้นที่	1.5 mm ²	0.25 mm ²	2.5 mm ²
ลักษณะพิเศษ	ใช้ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบชิกมาเดลต่ำอันดับหนึ่ง	ใช้ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบชาร์	ใช้ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบชิกมาเดลต่ำอันดับสอง และมีการทริม (trimming)

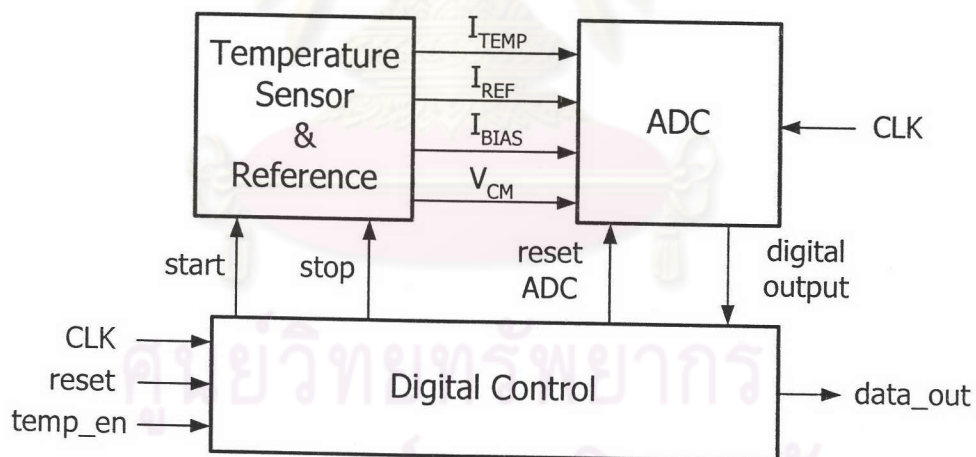
ตารางที่ 2-2 วงจรรวมวัดอุณหภูมิที่มีจำหน่ายทั่วไป

คุณสมบัติ	DS1626 [7]	LM92 [8]	AD7414 [9]
ความผิดพลาด	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 2^{\circ}\text{C}$
ช่วงอุณหภูมิ	-55°C ถึง 125°C	-55°C ถึง 125°C	-40°C ถึง 125°C
ความละเอียด	9 ถึง 12 บิต	12 บิต	10 บิต
กระแสขณะวัด	1 mA	350 μA	169 μA
แรงดันไฟเลี้ยง	2.7 ถึง 5.5 V	2.7 ถึง 5.5 V	2.7 ถึง 5.5 V
เวลาในการวัด	750 ms	500 ms	29 μs
ลักษณะพิเศษ	ใช้ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบชิกมาเดลต่ำ และการติดต่อด้วยสายไฟ 3 เส้น	ใช้ตัวแปลงแบบชิกมาเดลต่ำ การติดต่อแบบ I ² C	ใช้ตัวแปลงแบบชาร์และการติดต่อแบบ I ² C

2.2 ภาพรวมของวงจรวัดอุณหภูมิ

วงจรที่ออกแบบมีหน้าที่ในการวัดอุณหภูมิแล้วแสดงผลการวัดในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัลสู่ภายนอก โดยที่วงจรประกอบด้วยส่วนหลักๆ 3 ส่วน ได้แก่ วงจรวัดอุณหภูมิและสร้างสัญญาณอ้างอิง ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และวงจรควบคุมภาคดิจิทัล ดังแสดงในรูปที่ 2-1

วงจรส่วนแรก คือวงจรวัดอุณหภูมิสร้างสัญญาณอ้างอิงจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณที่แปรผันตามอุณหภูมิโดยใช้หลักการแรงดันผลต่างช่องว่างพลังงาน และสร้างสัญญาณอ้างอิงสำหรับสำหรับเปรียบเทียบให้กับตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล นอกจากนี้ยังต้องสร้างกระแสไบแอสเพื่อนำไปใช้ในการไบแอสตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและส่วนอื่นๆ ของวงจรอีกด้วย ส่วนถัดไปคือตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ซึ่งรับสัญญาณที่แปรผันตามอุณหภูมิและสัญญาณอ้างอิงจากส่วนแรกมาแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยตัวแปลงดังกล่าวจะต้องมีความละเอียดสูงกว่า 8 บิต ซึ่งเพียงพอในการแยกแยะกระแสที่แปรตามอุณหภูมิในช่วง -40 ถึง 120 องศาเซลเซียส ส่วนสุดท้ายคือ วงจรควบคุมภาคดิจิทัล ซึ่งทำหน้าที่ในการติดต่อกับภายนอกและควบคุมขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของวงจร โดยจะต้องทำการรับคำสั่งสำหรับการแปลงค่า แล้วควบคุมให้วงจรทำงาน ก่อนจะรับค่าสัญญาณดิจิทัลจากตัวแปลงแล้วประมวลผล ก่อนส่งข้อมูลออกสู่ภายนอกต่อไป



รูปที่ 2-1 ส่วนประกอบของวงจรวัดอุณหภูมิ

2.3 วงจรวัดอุณหภูมิและสร้างสัญญาณอ้างอิง

วงจรส่วนนี้จะสร้างสัญญาณที่แปรผันตามอุณหภูมิ โดยใช้หลักการของแรงดันผลต่างช่องว่างพลังงาน ซึ่งมีสัญญาณขาออกในรูปแบบของกระแสซึ่งมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิสัมบูรณ์หรือกระแสพีแทต (Proportional to Absolute Temperature Current, I_{PTAT}) นอกจากนี้วงจรส่วนนี้ยังสร้างกระแสอ้างอิง และแรงดันโหมดร่วมเพื่อป้อนให้กับตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลต่อไป

2.3.1 แรงดันผลต่างช่องว่างพลังงานและกระแสพีแทต

แรงดันผลต่างช่องว่างพลังงานอาศัยหลักการของระดับช่องว่างพลังงานของไดโอด เมื่อแรงดันตกคร่อมไดโอดต่างกันจะทำให้ช่องว่างพลังงานระหว่างชั้นนำกระแสกับชั้นแวลอนซ์ต่างกันด้วย ซึ่งแรงดันตกคร่อมไดโอดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งปัจจัยหนึ่งได้แก่ ค่าของความหนาแน่นกระแสที่ไหลผ่านไดโอด ซึ่งเราสามารถวัดแรงดันผลต่างช่องว่างพลังงานได้จากวงจรดังรูปที่ 2-2 ถ้ากำหนดให้กระแส I_1 และ I_2 มีค่าเท่ากัน และอัตราส่วนขนาดของทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ Q_2 ต่อ Q_1 ซึ่งต่อเป็นไดโอด มีค่าเป็น A ต่อ 1 จะพบว่าแรงดันตกคร่อมเบสกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะมีค่าแตกต่างกัน โดยสามารถหาค่าแรงดันผลต่างดังกล่าวได้จากสมการกระแสคอลเลกเตอร์คือ

$$I_1 = I_{S1} e^{\left(\frac{V_{BE1}}{V_T}\right)}$$

$$I_2 = I_{S2} e^{\left(\frac{V_{BE2}}{V_T}\right)}$$
(2-1)

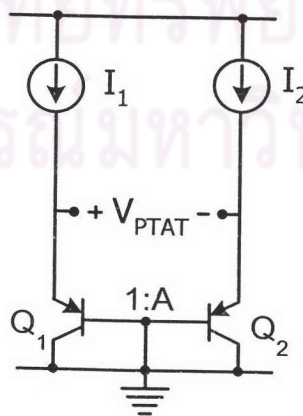
เมื่อ $V_T = \frac{kT}{q}$, I_S คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับของทรานซิสเตอร์แต่ละตัว

$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = V_T \ln\left(\frac{I_1}{I_2} \cdot \frac{I_{S2}}{I_{S1}}\right)$$

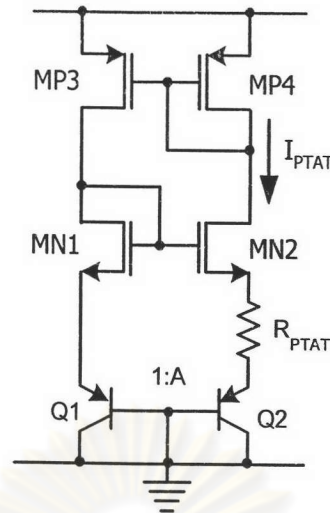
ซึ่ง $I_1 = I_2$ และ $I_{S2} = A \cdot I_{S1}$

$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = V_T \ln(A)$$
(2-2)

โดยจากสมการที่ (2-2) จะพบว่า ค่าผลต่างแรงดันของแรงดันคร่อมเบสกับอิมิตเตอร์ เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ จึงอาจเรียกแรงดันดังกล่าวว่า แรงดันพีแทต (Proportional To Absolute Temperature Voltage, V_{PTAT})



รูปที่ 2-2 วงจรสร้างแรงดันผลต่างช่องว่างพลังงาน



รูปที่ 2-3 วงจรสร้างกระแสที่แปรผันตามอุณหภูมิหรือกระแสพีแทต

จากหลักการการสร้างแรงดันพีแทตเบื้องต้น พบว่าแรงดันพีแทตนำไปใช้งานได้ยาก การแปลงแรงดันดังกล่าวให้อยู่ในรูปของกระแสจึงเป็นที่นิยมมากกว่า โดยวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสมีลักษณะดังรูปที่ 2-3 โดยที่กำหนดให้ขนาดทรานซิสเตอร์ MP3 เท่ากับ MP4 ซึ่งเป็นตัวบังคับให้กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ทั้งสองมีค่าเท่ากัน และถ้าให้ขนาดของทรานซิสเตอร์ MN1 และ MN2 เท่ากันจะสามารถเขียนสมการแรงดันได้คือ

$$V_{BE,Q1} + V_{GS,MN1} = V_{BE,Q2} + V_{R_{PTAT}} + V_{GS,MN2} \quad (2-3)$$

จะได้

$$V_{GS,MN1} = V_{GS,MN2}$$

$$V_{BE,Q1} = V_{BE,Q2} + V_{R_{PTAT}}$$

$$\Delta V_{BE} = V_{R_{PTAT}}$$

จากสมการที่ (2-2) จะได้

$$V_T \ln(A) = I_{PTAT} \cdot R_{PTAT}$$

$$I_{PTAT} = \frac{V_T}{R_{PTAT}} \ln(A) \quad (2-4)$$

โดยกระแสดังกล่าวเรียกว่ากระแสพีแทต (Proportional To Absolute Temperature Current, I_{PTAT}) โดยที่จะเป็นสัดส่วนของแรงดันพีแทตหารด้วยขนาดของความต้านทาน R_{PTAT}

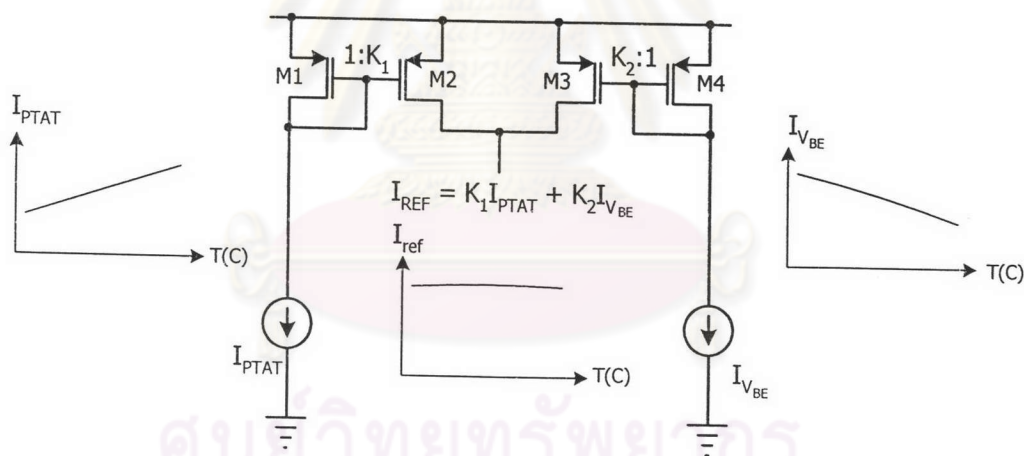
กระแสพีแทตที่สร้างได้นี้ นอกจากจะใช้เป็นกระแสที่ระบุถึงอุณหภูมิที่ทำการวัดแล้ว ยังถูกสะท้อนกระแสเพื่อนำไปใช้ในการไบแอสวงจรส่วนอื่นๆ เช่น ออปแอมป์ ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล อีกด้วย

2.3.2 กระแสอ้างอิง

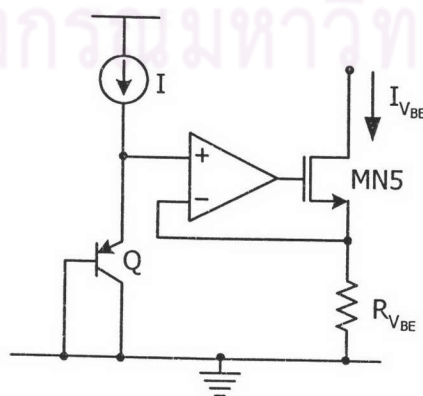
สัญญาณอ้างอิงจะถูกใช้เป็นระดับอ้างอิงในการแปลงค่าจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ซึ่งสัญญาณอ้างอิงนี้อยู่ในรูปของกระแส โดยที่กระแสอ้างอิงจะต้องมีคุณสมบัติคือ มีค่าคงที่ไม่แปรผันตามแรงดันไฟเลี้ยงและอุณหภูมิ กระแสดังกล่าวสามารถสร้างขึ้นได้จากวงจรไบแอสแบบช่องว่างแถบพลังงานโดยมีหลักการสร้างดังรูปที่ 2-4 ซึ่งอาศัยหลักการคล้ายคลึงกับการสร้างวงจรอ้างอิงแรงดันแบบช่องว่างแถบพลังงาน (Bandgap Voltage Reference) [10]

จากรูปกระแสอ้างอิงสร้างจากกระแสสองส่วน ส่วนแรกคือกระแสซึ่งเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ (I_{PTAT}) อีกส่วนหนึ่งคือกระแสที่แปรผันโดยตรงกับแรงดันคร่อมเบสกับอิมิตเตอร์ (I_{VBE}) ของทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ถ้ากำหนดอัตราส่วนของกระแสทั้งสองส่วน K_1 ต่อ K_2 ให้เหมาะสม จะทำให้ผลของอุณหภูมิของกระแสทั้งสองส่วนหักล้างกัน โดยที่กระแสอ้างอิง (I_{REF}) จะมีค่าเป็น

$$I_{REF} = K_1 I_{PTAT} + K_2 I_{VBE} \quad (2-5)$$



รูปที่ 2-4 วงจรสร้างกระแสอ้างอิงจากกระแส I_{PTAT} และ I_{VBE}



รูปที่ 2-5 วงจรสร้างกระแสที่แปรผันตามแรงดันคร่อมเบสกับอิมิตเตอร์ (I_{VBE})

การสร้างกระแสที่แปรผันตามอุณหภูมิสัมบูรณ์ (I_{PTAT}) สามารถสร้างขึ้นโดยอาศัยวงจรในหัวข้อ 2.3.1 ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่วนกระแสที่แปรผันตามแรงดันคร่อมเบสกับอิมิตเตอร์ (I_{VBE}) สร้างได้จากวงจรดังรูปที่ 2-5 เมื่อมีกระแสไหลผ่านอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ซึ่งต่อเป็นไดโอด จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมเบสกับอิมิตเตอร์ดังสมการ [10]

$$V_{BE(on)} = V_T \ln\left(\frac{I}{I_s}\right) \quad (2-6)$$

โดยที่

$$I_s = Bn_i^2 T \mu_n$$

และ

$$\mu_n = CT^{-n}$$

$$n_i^2 = DT^3 \exp\left(-\frac{V_{GO}}{V_T}\right)$$

เมื่อ B, C และ D คือค่าคงที่ซึ่งไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

μ_n คือค่าความว่องไวของอิเล็กตรอน (electron mobility)

n_i คือค่าความเข้มข้นของพาหะส่วนน้อย

V_{GO} คือแรงดันช่องว่างพลังงานของซิลิคอนที่ 0 องศาสัมบูรณ์

แทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการที่ (2-6) จะได้

$$V_{BE(on)} = V_T \ln\left(I \cdot T^{4-n} E \exp\left(\frac{V_{GO}}{V_T}\right)\right)$$

ทำการจัดรูปจะได้

$$V_{BE(on)} = V_{GO} + aV_T - bV_T \ln(T) \quad (2-7)$$

โดยที่ a และ b คือค่าคงที่ซึ่งไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

แรงดันที่ขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ Q1 จะต่อกับขาบวกของออปแอมป์ ถ้าออปแอมป์เป็นอุดมคติ กล่าวคือคือมีค่าอัตราขยายวงเปิดเป็นอนันต์ จะส่งผลให้แรงดันขาบวกและขาลบของออปแอมป์มีค่าเท่ากัน ดังนั้นจะสามารถหากระแสแปรผันตามแรงดันคร่อมเบสกับอิมิตเตอร์ (I_{VBE}) ได้คือ

$$I_{VBE} = \frac{V_{BE}}{R_{VBE}} \quad (2-8)$$

2.4 ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลจะแปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันหรือกระแส ให้เป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัล ซึ่งในกรณีของวงจรนี้ สัญญาณที่เข้าสู่วงจรแปลงอยู่ในรูปของกระแส

ดังนั้นโครงสร้างของวงจรแปลงที่เหมาะสม คือ ตัวแปลงแบบอินทิเกรตและ ตัวแปลงแบบโหมดกระแส (Current Mode ADC)

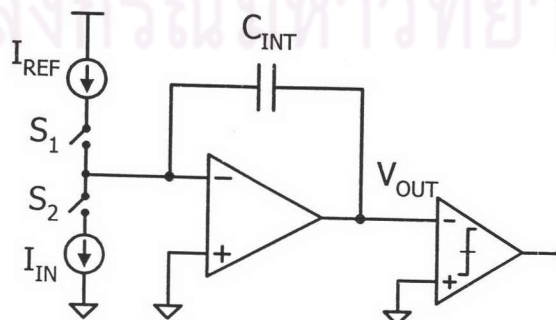
ตัวแปลงแบบอินทิเกรตมีอยู่หลายชนิด [11] โดยจะมีส่วนประกอบหลักคือ ตัวอินทิเกรต (Integrator) ซึ่งมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบดวลสโลป (Dual Slope ADC) ซึ่งรวมถึงแบบที่ได้ปรับปรุงโดยอาศัยหลักการของแบบดวลสโลป และแบบซิกมาเดลต้า (Sigma Delta ADC) [4,12] โดยที่ตัวแปลงในแบบอินทิเกรตนี้มีข้อดี คือ ให้ความแม่นยำสูง โครงสร้างไม่ซับซ้อนและกินกำลังค่อนข้างต่ำ แต่มีข้อเสียคือ อัตราการแปลง (Conversion Rate) ต่ำ ดังนั้นจะเหมาะกับการแปลงสัญญาณที่มีคงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้า

2.4.1 ตัวแปลงแบบดวลสโลป (Dual Slope ADC)

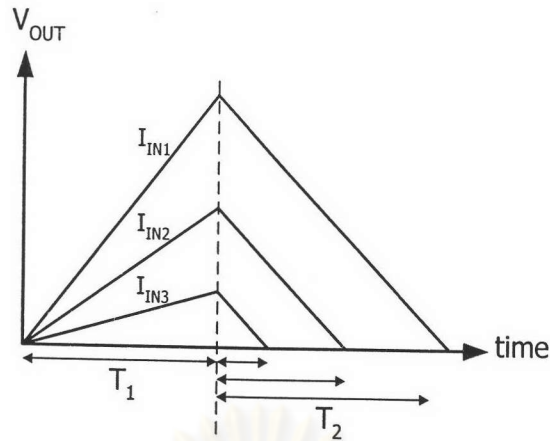
วงจรมีลักษณะดังรูปที่ 2-6 โดยการทำงานแบ่งเป็น 2 ช่วง ในช่วงแรก สวิตช์ S_2 จะปิด ส่วน สวิตช์ S_1 จะเปิด กระแสขาเข้า (I_{IN}) จะถูกอินทิเกรต ทำให้แรงดันขาออกของอินทิเกรเตอร์ (V_{OUT}) มีค่ามากขึ้นดังรูปที่ 2-7 โดยที่สัญญาณจะถูกอินทิเกรตเป็นเวลาคงที่ (T_1) เมื่อสิ้นสุดช่วงแรกแล้ว สวิตช์ S_2 จะปิด สวิตช์ S_1 จะเปิด ตัวอินทิเกรตจะเปลี่ยนนำกระแสอ้างอิงมาอินทิเกรตแทน ทำให้แรงดันขาออกมีค่าลดลงเป็นเส้นตรงด้วยความชันคงที่ดังรูปที่ 2-7 สัญญาณในช่วงเวลานี้จะถูกนำไปเข้าวงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันเพื่อหาเวลาที่ใช้ในการอินทิเกรตขาลง (T_2) ซึ่งเวลาดังกล่าวจะแปรผันโดยตรงตามขนาดของกระแสขาเข้าดังสมการ

$$T_2 = \frac{I_{IN}}{I_{REF}} \cdot T_1 \quad (2-9)$$

ข้อดีของตัวแปลงแบบดวลสโลปนี้คือ มีวงจรในส่วนดิจิทัลไม่ซับซ้อน ให้ความละเอียดสูง แต่มีข้อเสียคือ ค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการอินทิเกรต (C_{INT}) จะต้องมีค่าใหญ่มากพอ ที่ทำให้แรงดันขาออกของอินทิเกรเตอร์ไม่เกิดการขลิบขณะทำการอินทิเกรต



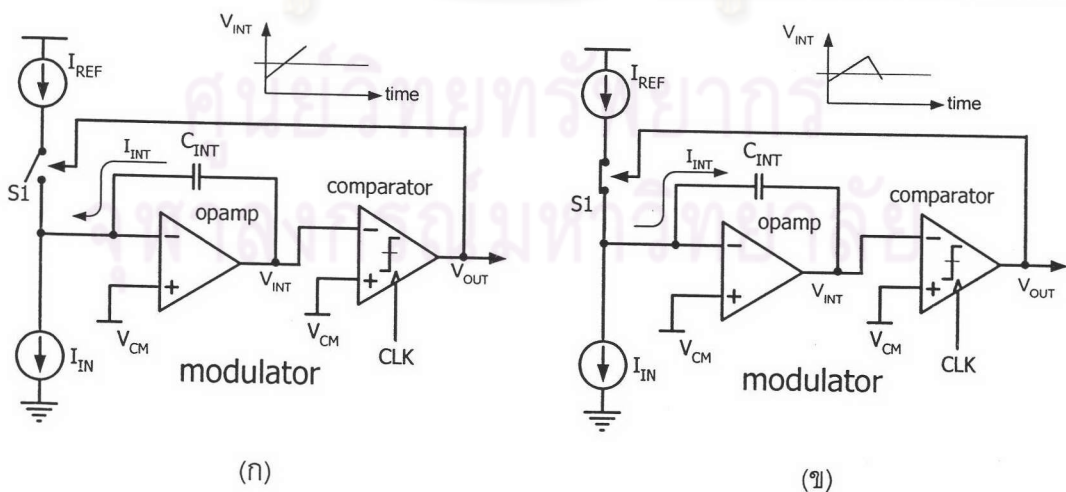
รูปที่ 2-6 วงจรของตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบดวลสโลป



รูปที่ 2-7 สัญญาณเชิงเวลาของแรงดันขาออกอินทิเกรเตอร์ ที่กระแสขาเข้าค่าต่างๆกัน

2.4.2 ตัวแปลงแบบซิกมาเดลต้า (Sigma-Delta ADC)

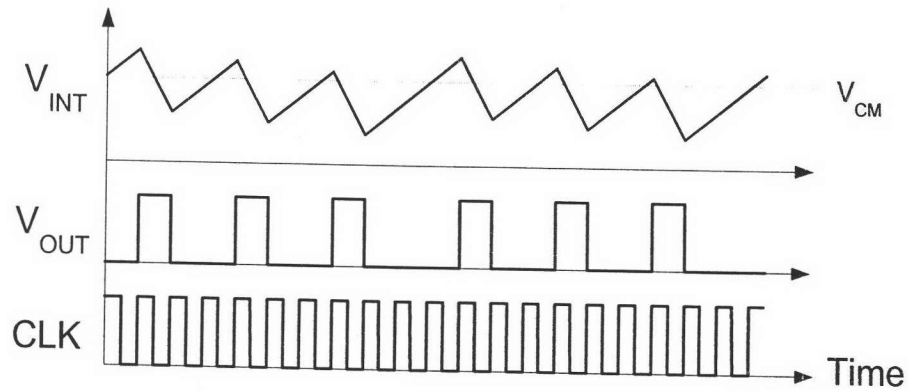
ตัวแปลงแบบซิกมาเดลต้าอันดับหนึ่งแบบเวลาต่อเนื่อง (Continuous Time $\Sigma\Delta$ ADC) มีลักษณะวงจรดังรูปที่ 2-8 ซึ่งตัวแปลงชนิดนี้อาศัยหลักการสุ่มเกิน (Oversampling) และการจัดสรรสัญญาณรบกวน (Noise-shaping) โดยรายละเอียดของหลักการดังกล่าวสามารถดูได้จากภาคผนวก ก. โดยการทำงานของวงจรมอดูเลเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ ภาวะเริ่มต้นให้สวิตช์ S1 เปิด กระแสจาก I_{IN} จะไหลออกจากตัวเก็บประจุ C_{INT} ทำให้แรงดันขาออกของอินทิเกรเตอร์จะเพิ่มขึ้น โดยเป็นสัดส่วนกับกระแส I_{IN} จากนั้นวงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันตามสัญญาณนาฬิกาจะทำการเปรียบเทียบระดับแรงดันดังกล่าวกับแรงดันอ้างอิง (V_{CM}) จากนั้นสัญญาณขาออกจากวงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันจะถูกป้อนกลับไปยังสวิตช์ S1 ถ้าสัญญาณมีค่าเป็นตรรกะต่ำสวิตช์ S1 จะยังคงเปิดอยู่ กระแส I_{IN} จะยังคงไหลออกจากตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2-8 การทำงานของตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบซิกมาเดลต้าอันดับหนึ่ง

(ก) ขณะที่สวิตช์ S1 เปิด

(ข) ขณะที่สวิตช์ S1 ปิด



รูปที่ 2-9 สัญญาณเชิงเวลาของแรงดันภายในมอดูเลเตอร์แบบซิกมาเดลต้า

C_{INT} ต่อไป จนกระทั่งมีค่ามากกว่า V_{CM} เมื่อมีการเปรียบเทียบ จะให้สัญญาณขาออกจากวงจร เปรียบเทียบระดับแรงดันเป็นตรรกสูง สวิตช์ S1 จะปิด เนื่องจาก $I_{REF} > I_{IN}$ กระแสจะไหลเข้าสู่ ตัวเก็บประจุในทิศทางตรงกันข้ามโดยมีค่าเป็น $I_{REF} - I_{IN}$ ซึ่งจะทำให้แรงดันขาออกของอินทิเกรเตอร์เอียงลงแทนจนกระทั่งแรงดันดังกล่าวน้อยกว่าแรงดันอ้างอิง สัญญาณขาออกที่ตัว เปรียบเทียบระดับแรงดันเป็นตรรกต่ำ ซึ่งจะให้สวิตช์ S1 เปิดใหม่ การทำงานของมอดูเลเตอร์จะ วนซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2-9

ค่าดิจิทัลขาออกที่ได้จากการแปลง สามารถหาได้โดยอาศัยสมมุติฐานว่าเมื่อทำการอินทิเกรตเป็นระยะเวลาสั้น ผลรวมของสัญญาณขาเข้าตัวอินทิเกรตเตอร์จะมีค่าเป็นศูนย์ โดยเขียน เป็นสมการในโดเมนเชิงเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete time domain) ได้ดังนี้

$$\sum_{n=m+1}^{m+N} I_{IN}[n] - \sum_{n=m+1}^{m+N} b_n \cdot I_{REF} = \frac{C \cdot \Delta V}{T_{CLK}} \quad (2-10)$$

เมื่อ N แทนจำนวนคาบของสัญญาณนาฬิกาที่ทำการซีกตัวอย่าง b_n แทนค่าตรรกของ สัญญาณดิจิทัลขาออกจากตัวมอดูเลเตอร์ C ซึ่งคือค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการอินทิเกรต และ ΔV คือ ผลต่างของสัญญาณขาออกจากตัวอินทิเกรตเตอร์ขณะเริ่มต้นการซีกตัวอย่างและหลังการ ซีกตัวอย่างทั้ง N คาบแล้ว โดยค่า ΔV สูงสุดที่เป็นไปได้คือ $\frac{T_{clk} \cdot I_{REF}}{C_{INT}}$ ซึ่งเมื่อแทนค่ากลับลงไปจะ ได้ว่าพจน์ทางด้านขวาของสมการที่ (2-10) มีค่าสูงสุดเป็น I_{REF} ดังนั้นเราสามารถประมาณให้มี ค่าเป็นศูนย์ได้ ถ้าทำการสุ่มสัญญาณ $N \cdot T_{CLK}$ มีค่าเป็นเวลานานเมื่อเทียบกับคาบสัญญาณ นาฬิกา ($N \gg 1$) และเนื่องจากกระแสขาเข้า I_{IN} และกระแสอ้างอิง I_{REF} เป็นกระแสไฟตรง ดังนั้น สามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$N \cdot I_{IN} - \sum_{n=m+1}^{m+N} b_n \cdot I_{REF} = \frac{C_{INT} \cdot \Delta V}{T_{clk}}$$

$$I_{IN} - \frac{1}{N} \sum_{n=m+1}^{m+N} b_n \cdot I_{REF} = \frac{C_{INT} \cdot \Delta V}{N \cdot T_{clk}}$$

ถ้า $N \gg 1$

$$\frac{I_{IN}}{I_{REF}} - \frac{1}{N} \sum_{n=m+1}^{m+N} b_n = \frac{C_{INT} \cdot \Delta V}{N \cdot T_{clk} \cdot I_{REF}} \leq \frac{1}{N} \approx 0$$

$$\frac{I_{IN}}{I_{REF}} = \frac{1}{N} \sum_{n=m+1}^{m+N} b_n \quad (2-11)$$

จากสมการที่ (2-11) จะพบว่าค่าของอัตราส่วนของกระแสขาเข้าต่อกระแสเชิงมีความสัมพันธ์กับค่าดิจิทัลขาออกจากตัวมอดูเลเตอร์ ข้อดีของตัวแปลงแบบนี้ คือ ให้สัญญาณขาออกเพียง 1 บิต ซึ่งทำให้สะดวกในการออกแบบระบบส่งข้อมูล และต้องการความแม่นยำของอุปกรณ์ต่ำ แต่มีข้อเสีย คือ ข้อมูลขาออกจากตัวมอดูเลเตอร์ต้องนำไปผ่านกระบวนการเชิงดิจิทัล (Digital Processing) เพื่อให้ได้จำนวนบิตที่ต้องการ

สำหรับตัวแปลงแบบใหม่กระแส สถาปัตยกรรมที่ได้มีการกล่าวถึง ได้แก่ ไปป์ไลน์, ชิกมาเดลต้า [13] และไซคลิก หรือขั้นตอนวิธี (Algorithmic) [14] ในอดีตโครงสร้างแบบใหม่กระแสจะให้ความละเอียดต่ำ เนื่องจากปัญหาการจับคู่ของกระแสภายในทรานซิสเตอร์ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำในการวัด ในขณะที่แบบใหม่แรงดันไม่ได้รับผลกระทบมากนัก อย่างไรก็ตามตัวแปลงแบบใหม่กระแสได้มีการพัฒนาแก้ไขมากขึ้น ซึ่งสามารถทำให้ได้ความละเอียดสูงมากขึ้น แม้ว่าตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบใหม่กระแสจะสามารถให้ความละเอียดได้เพียงพอ แต่พบว่า ได้รับความนิยมน้อย เมื่อเทียบกับตัวแปลงแบบอินทิเกรต อาจเนื่องมาจากตัวแปลงแบบนี้ได้รับความสนใจไม่มากนัก

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ เลือกโครงสร้างของตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่มีโครงสร้างแบบอินทิเกรต โดยเลือกโครงสร้างแบบชิกมาเดลต้าอันดับหนึ่ง เนื่องจากให้ความแม่นยำที่สูง วงจรไม่ซับซ้อน และใช้ขนาดของตัวเก็บประจุที่เล็กกว่าเมื่อเทียบกับแบบดูอัลสโกลบ อีกทั้งความแม่นยำของการแปลงก็ไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าของตัวเก็บประจุด้วย

2.5 วงจรควบคุมภาคดิจิทัล

วงจรควบคุมภาคดิจิทัลจะทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของวงจรวัดอุณหภูมิทั้งหมด โดยให้เป็นไปตามขั้นตอนที่กำหนด โดยที่วงจรประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรก คือ ส่วนควบคุมการทำงานของวงจร ทำหน้าที่รับและตรวจสอบคำสั่งจากภายนอก สร้างสัญญาณต่างๆ เพื่อควบคุมการทำงานของทั้งหมดของวงจร ตลอดจนใช้ในการแสดงผลออกสู่ภายนอก ส่วนที่สอง คือ

วงจรรีบ ซึ่งเป็นวงจรรองผ่านตัวแบบดิจิทัลอย่างง่าย โดยนับจำนวนพัลส์ขาออกที่ได้จากตัวแปลง แอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบซิกมาเดลต้าซึ่งเป็นข้อมูลดิจิทัลที่แปลงได้

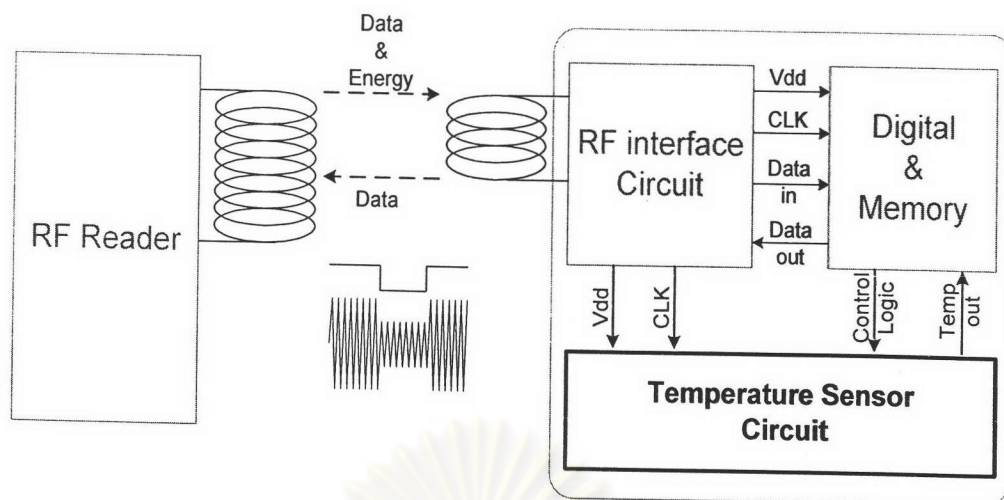
2.6 การทำงานของวงจรวัดอุณหภูมิร่วมกับ RFID

เทคโนโลยี RFID (Radio Frequency Identification) เป็นระบบการสื่อสารไร้สายแบบหนึ่งที่ใช้ในการระบุวัตถุหรือบุคคลต่างๆโดยใช้คลื่นวิทยุเป็นตัวกลางในการติดต่อสื่อสาร ซึ่งปัจจุบันกำลังเป็นที่นิยมขึ้นอย่างมาก เนื่องจากมีความสะดวกในการใช้งาน และเหมาะสมกับการทำงานแบบอัตโนมัติ สามารถทำงานได้ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันได้ โดยไม่จำเป็นต้องทำงานแบบที่ต้องเห็นอุปกรณ์ (line of sight) และนอกจากนี้ยังมีความปลอดภัยในการใช้งานสูง

RFID โดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ ดังรูปที่ 2-10 สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนของตัวอ่าน (Reader) และส่วนของตัววงจรรวม RFID ตัวอ่านจะทำหน้าที่ในการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้กับตัวการ์ดผ่านทางขดลวด โดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งมานั้น อาจจะมีข้อมูลถูกมอดูเลตส่งเข้ามาด้วย วงจรรวม RFID จะต้องตรวจสอบข้อมูลที่ฝั่งตัวอ่านส่งมาด้วย และในกรณีของวงจรรวมในแบบพาสซีฟ (Passive Tag) ซึ่งวงจรรวมไม่มีแบตเตอรี่ วงจรจะต้องทำการแปลงพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นพลังงานสำหรับวงจรทั้งหมด โดยหลักการการทำงานทั้งหมดนี้จะถูกทำโดยส่วนของวงจรเชื่อมต่อคลื่นวิทยุ (RF Interface) ข้อมูลที่ได้จากส่วนแรกจะถูกนำไปประมวลผลต่อไปด้วยวงจรรวมภาคดิจิทัล ซึ่งภายในจะประกอบด้วยระบบประมวลผลตลอดจนหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูล ข้อมูลดังกล่าวจะถูกประมวลผล เมื่อเสร็จสิ้นแล้วข้อมูลใหม่จะถูกกลับไปยังตัวอ่านต่อไปทางคลื่นวิทยุ

สำหรับการใช้งานของวงจรวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัลร่วมกับเทคโนโลยี RFID นั้น ในสภาวะปกติวงจรวัดอุณหภูมิจะไม่ทำงาน เมื่อต้องการวัดค่าอุณหภูมิ ตัวอ่านจะส่งชุดคำสั่งพิเศษมายังส่วนของตัวแท็ก เมื่อประมวลผลคำสั่งดังกล่าวแล้ว ส่วนวงจรรวมดิจิทัลหลักของตัวแท็ก จะส่งคำสั่งให้วงจรวัดอุณหภูมิทำงาน เมื่อการวัดอุณหภูมิเสร็จสิ้น วงจรวัดอุณหภูมิจะส่งผลการวัดในรูปแบบสัญญาณดิจิทัลกลับไปยังวงจรรวมดิจิทัลหลักของ RFID เพื่อประมวลผลก่อนส่งกลับไปยังตัวอ่าน

วงจรรวม RFID ที่ใช้ร่วมกับวงจรวัดอุณหภูมิ เป็นวงจรรวม RFID ของบริษัท ซิลิคอน คราฟต์ เทคโนโลยี จำกัด เบอร์ SIC7960 มีคุณสมบัติ คือ มีหน่วยความจำอีพรอม (EEPROM) ขนาด 1056 บิต ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 32 บล็อก แต่ละบล็อกมีขนาด 33 บิต ใช้คลื่นวิทยุความถี่ 125 กิโลเฮิร์ตซ์ สามารถมอดูเลชันได้หลายแบบ เช่น ASK, PSK เลือกอัตราการส่งข้อมูลได้ และสามารถทำงานแบบมีรหัสผ่าน (password) ได้ [15]



รูปที่ 2-10 ส่วนประกอบของระบบ RFID ซึ่งมีวงจรวัดอุณหภูมิอยู่ภายในชิป RFID

2.7 สรุปท้ายบท

ในบทนี้ได้กล่าวถึงงานวิจัยต่างๆ ที่เคยมีการวิจัยมาก่อน ตลอดจนวงจรรวมสำหรับวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัลที่มีจำหน่ายทั่วไป และได้กล่าวถึงภาพรวมของระบบวัดอุณหภูมิตลอดจนหลักการการทำงานร่วมกับเทคโนโลยี RFID โดยตัววงจรมีส่วนประกอบออกได้เป็น 3 ส่วนคือ

- วงจรวัดอุณหภูมิและสร้างสัญญาณอ้างอิง ซึ่งให้สัญญาณขาออกในรูปกระแส โดยสร้างจากแรงดันผลต่างช่องว่างพลังงาน ส่วนกระแสอ้างอิงนั้นสร้างได้โดยอาศัยหลักการของแรงดันช่องว่างแถบพลังงาน
 - ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ใช้โครงสร้างแบบซิกมาเดลต้าอันดับหนึ่งโดยรับสัญญาณขาเข้าในรูปของกระแส
 - วงจรดิจิทัล ซึ่งประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนของวงจรควบคุมการทำงานของวงจรมีและวงจรมีสำหรับทำการนับสัญญาณขาออกจากตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล
- สำหรับรายละเอียดในการออกแบบวงจรมีจะกล่าวในบทถัดไป