หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

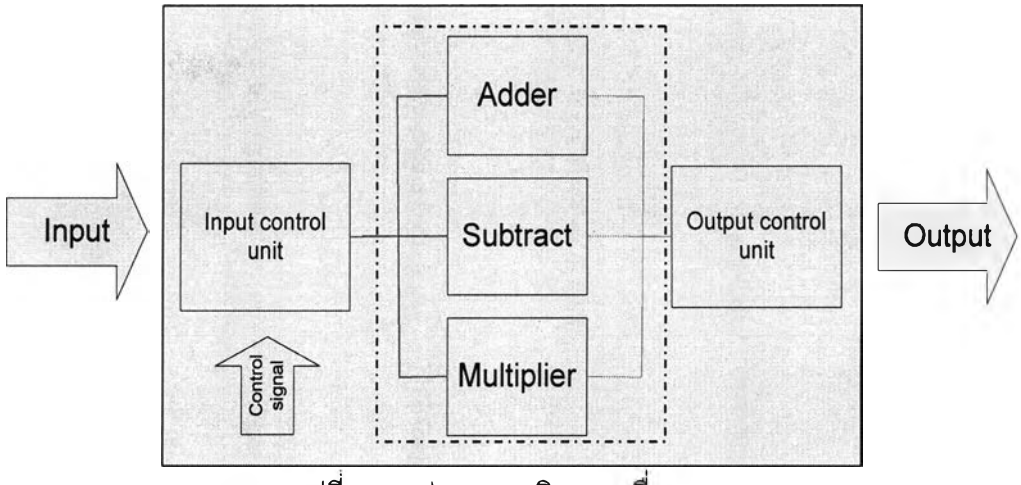
แนวคิดในการออกแบบและพัฒนาวงจร

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบหน่วยเลขคณิตแบบเชื่อมตรงโดยการนำอัลกอริทึมการบวก ลบ และ คูณ แบบเชื่อมตรงมาสร้างรวมเป็นหน่วยเลขคณิต และพัฒนาวงจรคูณให้สามารถทำการประมวลผลได้ถึง 64 ดิจิตเนื่องจากวงจรคูณแบบเชื่อมตรงนั้นมีข้อจำกัดด้านขนาดของข้อมูลที่จะนำเข้ามาประมวลผลซึ่งในงานวิจัยนี้เราได้ออกแบบให้วงจรคูณแบบเชื่อมตรงสามารถรองรับการประมวลผลที่ขนาด 64 ดิจิต และตัวดำเนินการ บวกและลบ ไม่มีข้อจำกัดด้านขนาดของข้อมูล ซึ่งจะกล่าวไว้ในส่วนของรายละเอียดของตัวดำเนินการบวกและลบ โดยได้เพิ่มวงจรควบคุมการทำงานเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของหน่วยเลขคณิตและเลือกใช้ตัวดำเนินการแต่ละตัวในการประมวลผลและควบคุมการส่งผลลัพท์ออกจากหน่วยเลขคณิตด้วย

3.1 โครงสร้างของหน่วยคณิตศาสตร์แบบเชื่อมตรง

เรามีแนวคิดที่จะออกแบบโครงสร้างหน่วยเลขคณิตแบบเชื่อมตรง โดยจะประกอบด้วย 3 ส่วนดังรูปที่ 3.1 คือ

1. หน่วยควบคุมสัญญาณขาเข้า (Input Control Unit) จะทำหน้าที่รับข้อมูลป้อนเข้า (input) และควบคุมโดยสัญญาณควบคุม(Control signal)
2. หน่วยดำเนินการทางคณิตศาสตร์แบบเชื่อมตรงซึ่งประกอบด้วย ตัวดำเนินการบวก (Adder), ตัวดำเนินการลบ (Subtract) และตัวดำเนินการคูณ (Multiplier)
3. หน่วยควบคุมสัญญาณขาออก (Output control unit) จะทำหน้าที่ควบคุมการส่งผลข้อมูลออก



รูปที่ 3.1 หน่วยเลขคณิตแบบเชื่อมตรง

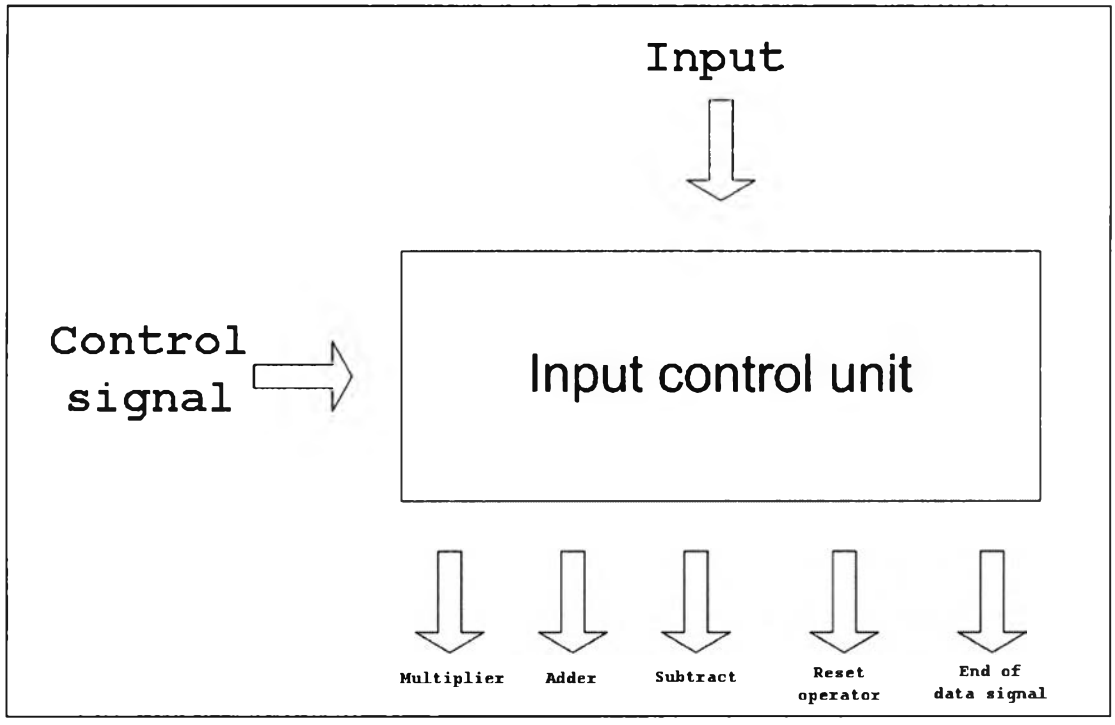
หน่วยเลขคณิตแบบเชื่อมตรงที่ออกแบบจะถูกควบคุมด้วยวงจรควบคุมสัญญาณขาเข้า โดยใช้สัญญาณควบคุมเพื่อรับสัญญาณเชิงเลขคณิตศาสตร์แบบซ้ำซ้อนเข้า และเลือกใช้ตัวดำเนินการแบบเชื่อมตรงใดในการทำงานประมวลผล หลังจากได้ผลลัพท์แล้วจะส่งผลที่ได้ผ่านวงจรควบคุมสัญญาณขาออกเพื่อที่จะจัดการปรับปรุงรูปแบบของสัญญาณขาออกและส่งข้อมูลออกจากหน่วยเลขคณิตแบบเชื่อมตรง

3.2 **หน่วยควบคุมสัญญาณขาเข้า** (Input Control Unit)

หน่วยควบคุมสัญญาณขาเข้าจะทำหน้าที่การทำงานดังนี้

1. รับสัญญาณป้อนเข้า
2. เลือกใช้งานตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์แบบเชื่อมตรง 3 ชนิด คือบวก ลบ และคูณ
3. ปรับปรุงสถานะของตัวดำเนินการทั้งหมดให้เป็นค่าตั้งต้น (Reset operator)

ซึ่งจะทำงานโดยสัญญาณควบคุม ดังรูปที่ 3.2 ได้แสดงชนิดของสัญญาณที่เข้าและออกจากหน่วยควบคุม



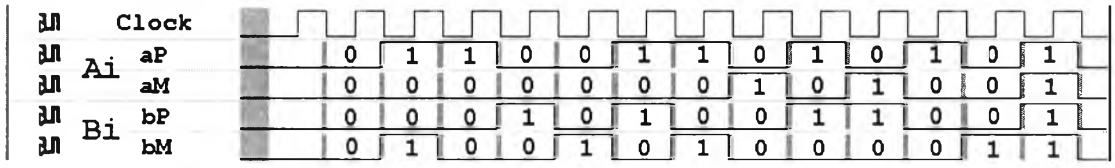
รูปที่ 3.2 ชนิดของสัญญาณที่เข้าและออกจากหน่วยควบคุมสัญญาณขาเข้า

ข้อมูลป้อนเข้า เป็นสัญญาณเชิงเลขคณิตศาสตร์แบบซ้ำซ้อน ที่ป้อนเข้าประมวลผลโดยหน่วยเลขคณิตแบบเชื่อมตรง ซึ่งมีรูปแบบของสัญญาณเป็นเลขฐานสองซ้ำซ้อนและจะมีข้อกำหนดของรูปแบบสัญญาณที่จะนำมาใช้ในวงจรดำเนินการเลขคณิตแบบเชื่อมตรงดังนี้

1. ข้อมูลเข้า 1 ดิจิต มีค่าตั้งแต่ (-1, 0, 1) และแทนค่าด้วยบิตบวกและลบดังแสดงไว้ในบทที่ 2
2. บิตที่ใช้บอกว่าเป็นการจบชุดของข้อมูล จะต้องมีสถานะของบิตบวกและลบมีค่าเท่ากับ 1 ทั้งสองค่า เนื่องจากในการแทนค่าของสัญญาณเชิงเลขคณิตแบบซ้ำซ้อนนั้น ค่าข้อมูล 0 นั้นจะสามารถแสดงบิตบวกและลบเป็น 0 หรือ 1 ทั้งสองค่าได้เหมือนกัน ดังนั้นเราจึงเลือกค่าบิทเท่ากับ 1 มาใช้แสดงการจบชุดของข้อมูล เพราะค่าบิทเท่ากับ 1 ทั้งสองค่ายากต่อการอ่านค่าและแสดงผลมากกว่าค่าบิท 0 ทั้งสองค่า โดยที่ใน 1 รอบสัญญาณนาฬิกาจะมีการนำข้อมูลเข้า 4 บิท โดยที่แยกเป็น

   Ai (aP (บิท +), aM (บิท -)) และ

   Bi (bP (บิท +), bM (บิท -))



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างสัญญาณเชิงเลขคณิตแบบซ้ำซ้อน

จากรูปที่ 3.3 ค่าของ Ai = aP – aM โดยที่ค่า 1 บิทสุดท้ายของข้อมูลจะไม่นำมาคำนวณด้วยเนื่องจากเป็นบิทที่บอกการสิ้นสุดของชุดข้อมูลและบิทสุดท้ายนี้จะถูกตรวจสอบโดยหน่วยควบคุมและส่งสัญญาณจบชุดข้อมูลเพื่อไปส่งสัญญาณสิ้นสุดของข้อมูลไปยังหน่วยควบคุมสัญญาณขาออกเพื่อทำงานต่อไป

aP = 0 1 1 0 0 1 1 0 1 0 1 0

aM = 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0

Ai = 0 1 1 0 0 1 1 $\bar{1}$ 1 $\bar{1}$ 1 0

Ai = 1622

และ ค่าของ Bi เช่นกันจะเท่ากับ

bP = 0 0 0 1 0 1 0 0 1 1 0 0

bM = 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1

Bi = 0 $\bar{1}$ 0 1 $\bar{1}$ 1 $\bar{1}$ 0 1 1 0 $\bar{1}$

Bi = -853

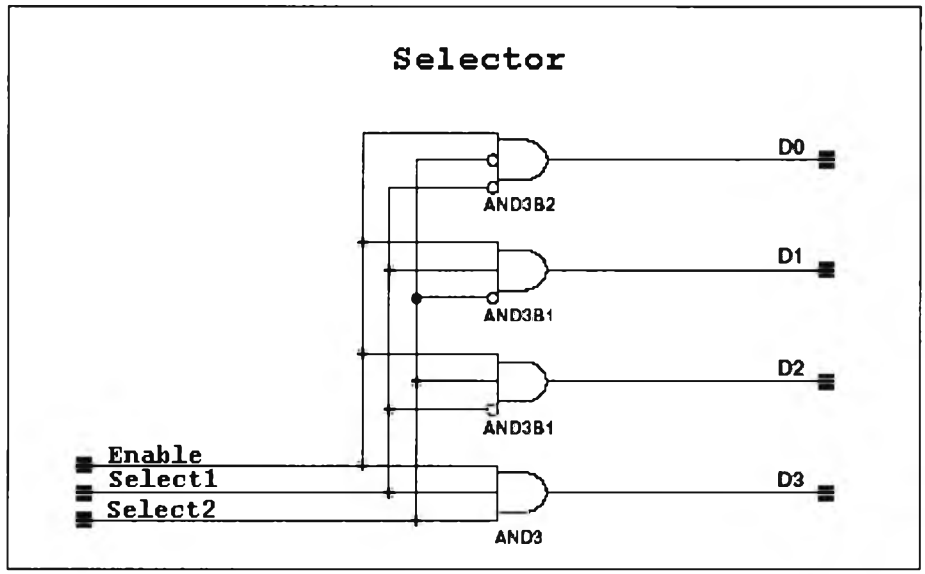
และสัญญาณข้อมูลที่ออกจากหน่วยควบคุมสัญญาณขาเข้าและนำไปประมวลผลโดยตัวดำเนินการเลขคณิตแบบเชื่อมตรงนั้นจะเป็นข้อมูลชุดเดียวกันกับข้อมูลขาเข้า

ในส่วนของสัญญาณควบคุมนั้นจะใช้เพื่อสั่งให้หน่วยเลขคณิตให้ทำการรับข้อมูลเข้าและนำไปประมวลผลในตัวดำเนินการที่เลือก หรือ ปรับตั้งค่าของหน่วยเลขคณิตให้อยู่ในสถานะตั้งต้น โดยที่รูปแบบของสัญญาณจะกล่าวในส่วนรายละเอียดของวงจร และแสดงให้เห็นในส่วนของผลการทดลอง

หน่วยควบคุมสัญญาณขาเข้าที่ได้ออกแบบจะแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ

1. ส่วนเลือกตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Selector)

มีหน้าที่เลือกตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์แบบเชื่อมตรงโดยมีสัญญาณควบคุม ใช้ 3 สัญญาณในการเลือกว่าจะทำการเลือก บวก (D2) ลบ (D1) คูณ (D3) และกลับค่าหน่วยเลขคณิตให้อยู่ในสถานะตั้งต้น (D0) มีรายละเอียดของวงจรดังนี้



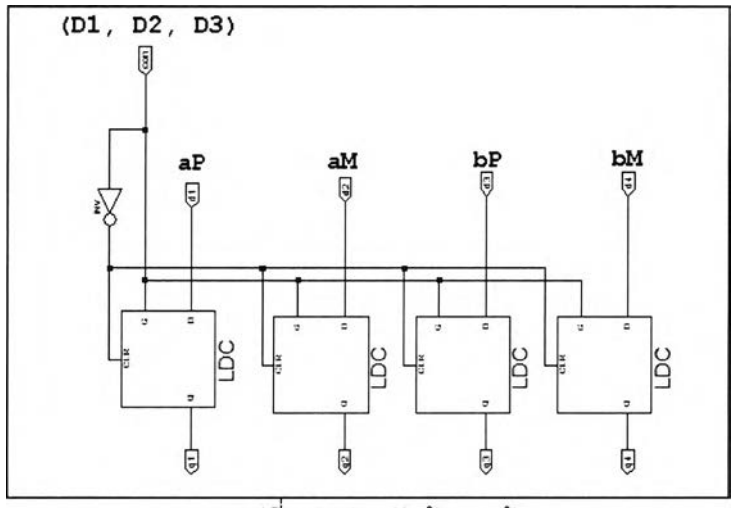
รูปที่ 3.4 วงจรเลือกตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสัญญาณที่ใช้ควบคุมการรับข้อมูลเข้าและเลือกตัวดำเนินการ

สถานะของขาสัญญาณ			การดำเนินการ
Enable	Select1	Select2	
0	X	X	ไม่รับข้อมูลเข้า (D0-D3 = 0)
1	0	0	กลับสู่ค่าตั้งต้น (D0 = 1)
1	1	0	รับข้อมูลเข้าประมวลผลโดยตัวดำเนินการลบ (D1 = 1)
1	0	1	รับข้อมูลเข้าประมวลผลโดยตัวดำเนินการบวก (D2= 1)
1	1	1	รับข้อมูลเข้าประมวลผลโดยตัวดำเนินการคูณ (D3 = 1)

2. ส่วนรับข้อมูลเข้า (Input latch)

ทำหน้าที่รับข้อมูลเข้าและส่งออกไปยังตัวดำเนินการที่ต่ออยู่โดยจะอยู่ในสถานะที่ส่งข้อมูลออกเมื่อได้รับสัญญาณจากส่วนเลือกตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์ วงจรประกอบด้วย Latch จำนวน 4 ตัวดังรูป 3.5

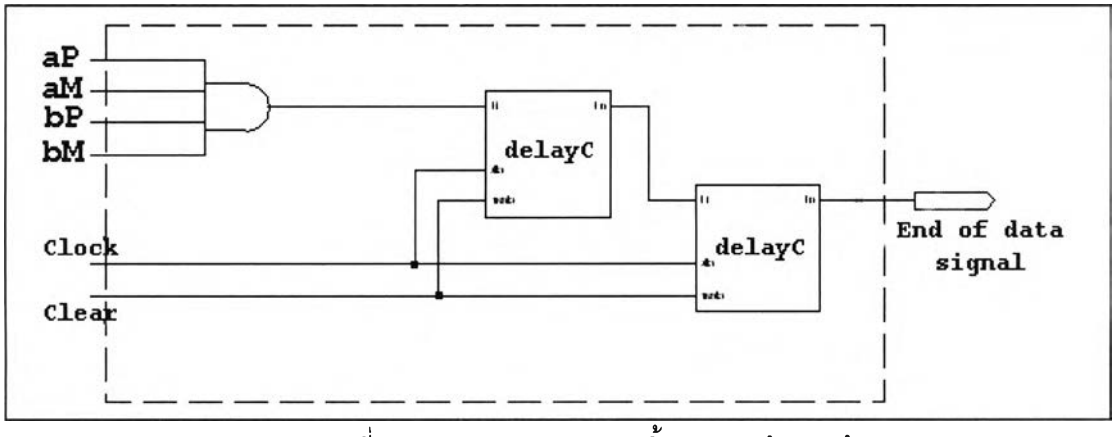


รูปที่ 3.5 ส่วนรับข้อมูลเข้า

โดยถ้ามีสัญญาณ (D1, D2, D3) เข้ามามีสถานะ 1 จะทำการส่งข้อมูลไปยังตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์แบบเชื่อมตรง แต่ถ้าสัญญาณ (D1, D2, D3) มีค่าเป็น 0 จะไม่มีการส่งค่าใดๆ ออก

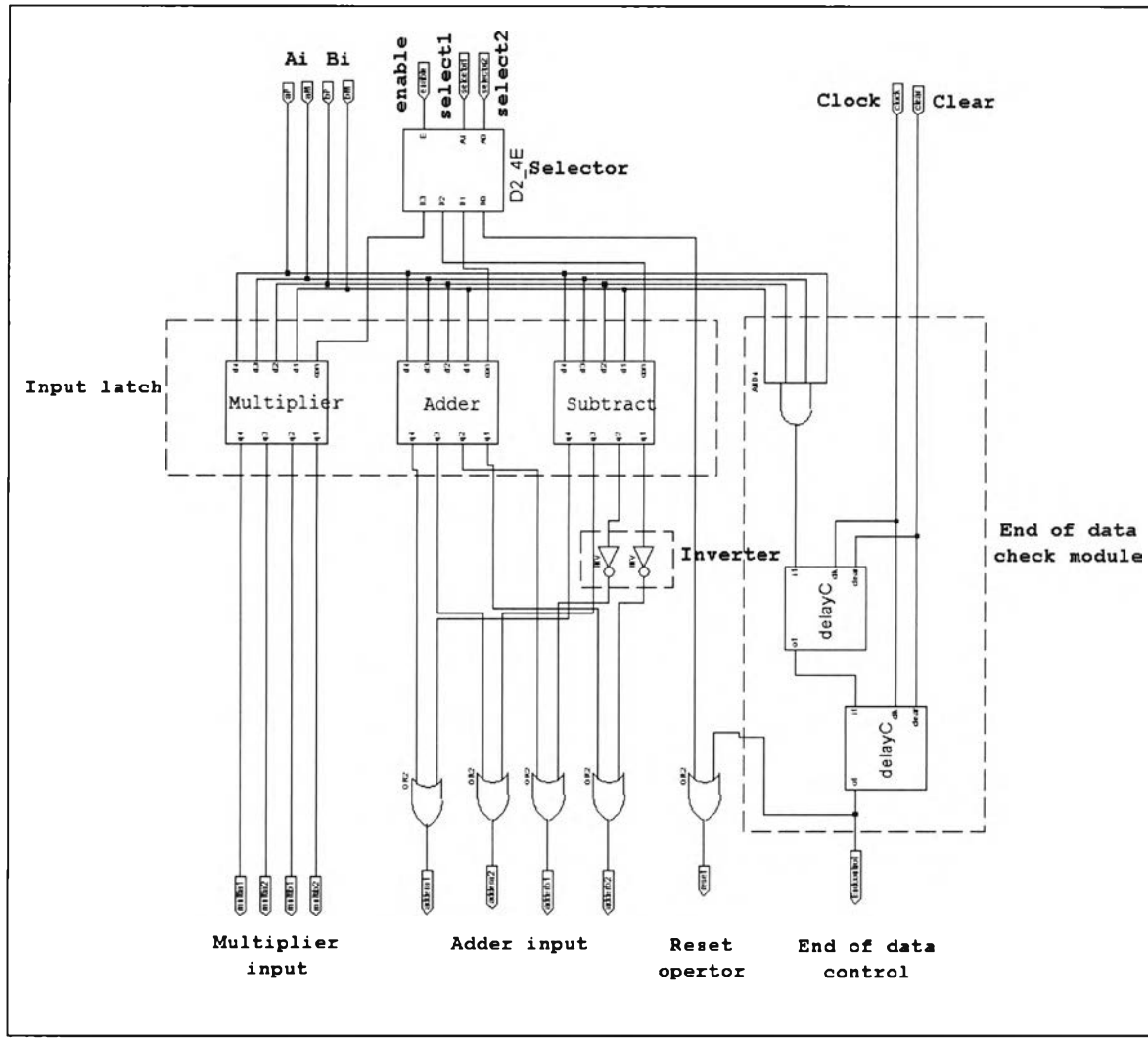
3. ส่วนตรวจสอบการสิ้นสุดของข้อมูลเข้า (End of data check module)

จะทำหน้าที่ตรวจสอบว่าสิ้นสุดข้อมูลขาเข้าแล้วหรือไม่โดยใช้ข้อกำหนดของข้อมูลข้างต้น โดยใช้ แอนด์เกต (AND4) เพื่อตรวจสอบโดยถ้าข้อมูลเข้าเป็น 1 ทั้งหมดจะทำการส่งสัญญาณสิ้นสุดข้อมูลไปยังหน่วยควบคุมสัญญาณขาออกโดยจะหน่วงเวลาไว้เป็นเวลา 2 รอบสัญญาณนาฬิกา ทั้งนี้เป็นเพราะข้อจำกัดของตัวดำเนินการคณิตศาสตร์แบบเชื่อมตรง ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดของตัวดำเนินการแบบเชื่อมตรงต่อไป ซึ่งวงจรตรวจสอบการสิ้นสุดของข้อมูลเข้า มีรายละเอียดดังรูป 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรตรวจสอบการสิ้นสุดของข้อมูลเข้า

จากส่วนประกอบทั้งหมด เรารวมเข้าเป็นวงจรควบคุมสัญญาณขาเข้าแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 โดย ในส่วนที่จะส่งข้อมูลไปประมวลผลด้วยตัวดำเนินการลบนั้น ได้ใส่วงจรกลับค่าสัญญาณไว้ในค่าของข้อมูล Bi เนื่องจากสัญญาณเชิงเลขคณิตศาสตร์แบบซ้ำซ้อนนั้นมีคุณสมบัติที่สามารถกลับค่าแล้วทำให้ค่าของเครื่องหมายมีค่าตรงข้าม ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนของตัวดำเนินการลบแบบเชื่อมตรงต่อไป



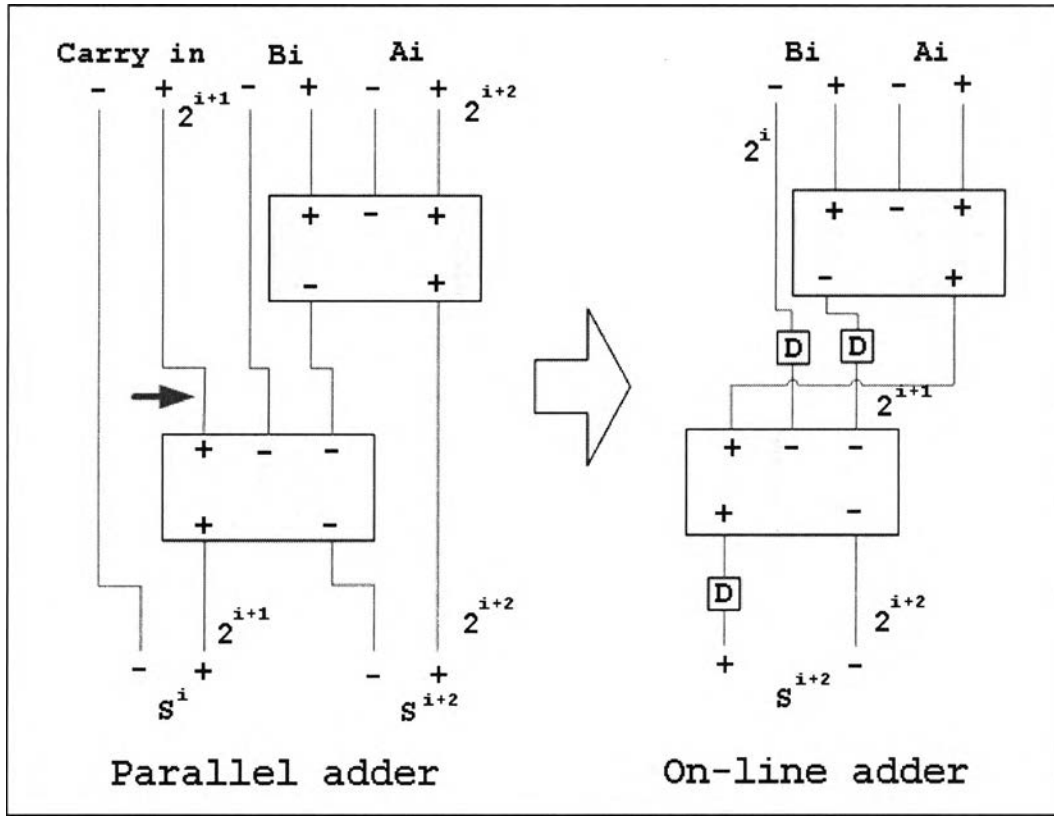
รูปที่ 3.7 วงจรควบคุมสัญญาณขาเข้า

3.3 **วงจรดำเนินการแบบเชื่อมตรง** (On-line operator)

ในส่วนของวงจรดำเนินการแบบเชื่อมตรงทั้ง 3 วงจรนั้น เราได้นำเอาอัลกอริทึมจากบทที่ 2 มาออกสร้างเป็นวงจรในการคำนวณแบบเชื่อมตรงโดยมีวงจรบวก ลบ และคูณ ซึ่งโดยเฉพาะวงจรคูณ เราจะทำการออกแบบเพื่อให้สามารถรองรับข้อมูลขนาด 64 ดิจิตโดยมีรายละเอียดโครงสร้างและการออกแบบภายใน ดังนี้

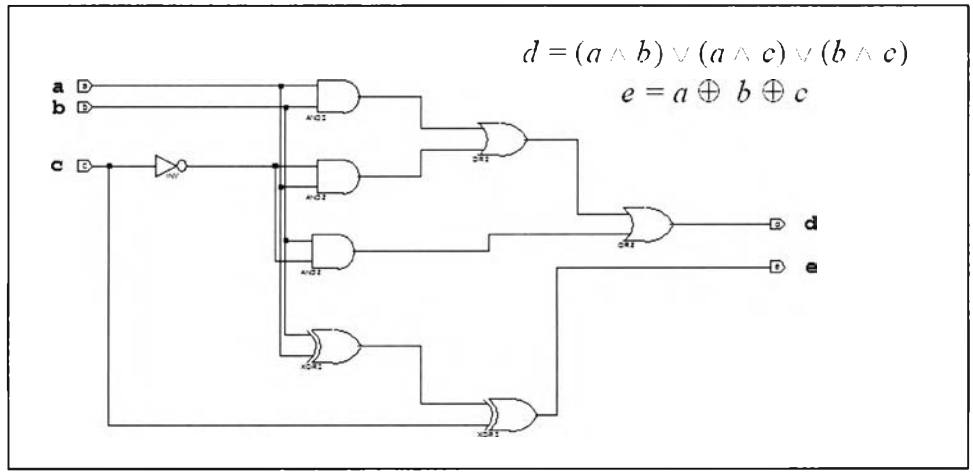
3.31 วงจรบวกแบบเชื่อมตรง

วงจรบวกแบบเชื่อมตรงนั้นจะถูกปรับปรุงมาจากวงจรบวกแบบขนานโดยได้เพิ่มวงจรหน่วงเพื่อหน่วงผลของหลักที่ i+2 เพื่อรอตัวทดที่มาจากผลการทำงานในหลักที่ i+1 ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 รูปการแปลงจากวงจรบวกแบบขนานเป็นวงจรบวกแบบเชื่อมตรง

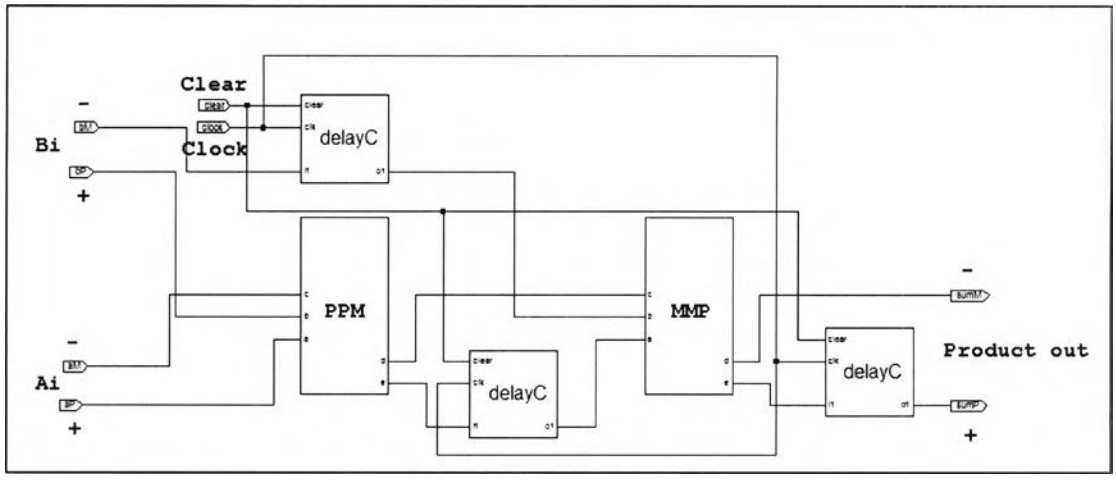
วงจรบวกแบบเชื่อมตรงประกอบด้วยวงจรหน่วง จำนวน 3 ชุด เชื่อมต่อกับวงจร พีพีเอ็มเซล(PPM cell) จำนวน 2 ชุด ซึ่งวงจรพีพีเอ็มเซล(PPM cell) จะคำนวณข้อมูลขาออก d และ e จากข้อมูลขาเข้า a, b และ c โดยมีการดำเนินการดังนี้ 2d – e = a + b – c ภายในวงจรพีพีเอ็มสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรพีพีเอ็มเซล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยรายละเอียดโครงสร้างของวงจรบวกแบบเชื่อมตรงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรบวกแบบเชื่อมตรง

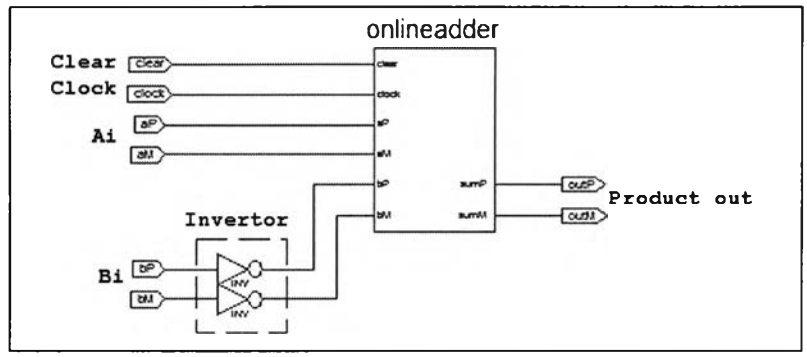
3.3.2 **วงจรลบแบบเชื่อมตรง** (On-line Subtract)

เนื่องจากคุณสมบัติของจำนวนแบบมีเครื่องหมาย เราสามารถสร้างวงจรลบแบบเชื่อมตรงได้โดยนำวงจรบวกแบบเชื่อมตรงมาประยุกต์ใช้ โดยเพิ่มการกลับค่าของสัญญาณเชิงเลขที่จะนำมาลบเข้าไปในวงจร เนื่องจากค่าของข้อมูลที่นำเข้ามาดำเนินการในวงจรนั้นมีค่าตั้งแต่ (-1, 0, 1) ซึ่งมีคุณสมบัติซ้ำซ้อนและสมมาตร ดังนี้เราจึงสามารถใช้ประโยชน์จากคุณสมบัตินี้เพื่อใช้ในการดำเนินการลบได้แสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าของข้อมูลหลังใส่วงจร inverter เพื่อกลับค่าของข้อมูล

ก่อนใส่วงจรกลับค่า			หลังใส่วงจรกลับค่า		
ค่าเลขซ้ำซ้อน	+	-	+	-	ค่าเลขซ้ำซ้อน
-1	0	1	1	0	1
0	0	0	1	1	0
1	1	0	0	1	-1

เราได้กำหนดให้มีการทำงานการลบโดย Ai – Bi ซึ่งนำวงจรกลับค่าต่อเข้ากับขาเข้าของวงจรบวกแบบเชื่อมตรงคู่หนึ่ง ในที่นี้เราต่อเข้ากับค่า Bi ดังรูปที่ 3.11



รูป 3.11 วงจรลบแบบเชื่อมตรง

โดยมีสมการคือ

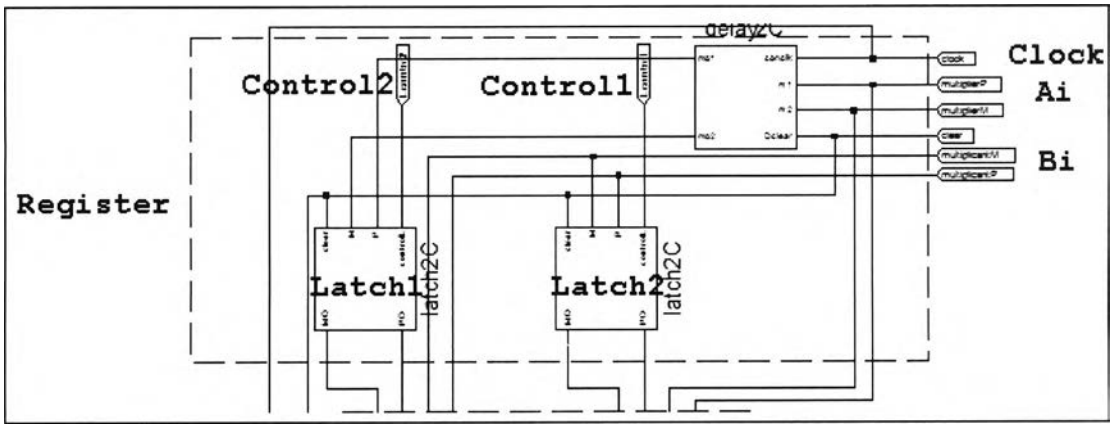
$$Sum_{i+2} = A_i + (-B_i)$$

เนื่องจากใช้วงจรบวกแบบเชื่อมตรงในการดำเนินการลบดังนั้นเราจึงใช้วงจรบวกเพียงตัวเดียว เลือกการดำเนินการโดยหน่วยควบคุมสัญญาณขาเข้าซึ่งได้ใส่วงจรกลับค่าสัญญาณเข้าไปในวงจรควบคุมสัญญาณขาเข้าไว้แล้วข้างต้น

3.3.3 **วงจรคูณแบบเชื่อมตรง** (On-line Multiplier)

วงจรคูณแบบเชื่อมตรงระดับดิจิตแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ Register, Multiplication และ Parallel adder ดังรูป 3.9

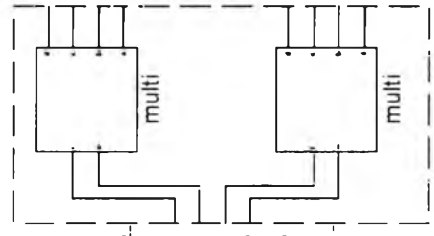
1) รีจิสเตอร์ (Register) ประกอบด้วย แลตช์ (Latch) 2 ชุด และ ดีเลย์ (Delay) 2 ชุดจะทำหน้าที่ จัดการควบคุมลำดับการเข้าประมวลผลของข้อมูลตัวตั้ง และข้อมูลตัวคูณโดยจะทำการเก็บค่าของตัวตั้งและตัวคูณในลำดับที่วงคูณนี้อยู่ เช่น ถ้าอยู่ในลำดับแรกก็จะเก็บค่าตัวตั้งและตัวคูณในลำดับที่มีนัยสำคัญสูงที่สุดไว้ โดยมีรายละเอียดวงจรดังนี้



รูปที่ 3.12 รีจิสเตอร์

ซึ่งในส่วนนี้จะมีการควบคุมการเก็บค่าตัวตั้งและตัวคูณโดยขาสัญญาณ control1 และ control2 ตามลำดับ

2) มัลติพลิเคชั่น (Multiplication) ทำหน้าที่คูณข้อมูล 2 ชุดเข้าด้วยกันประกอบด้วยเซลตัวคูณ 2 ตัวดังรูปที่ 3.13



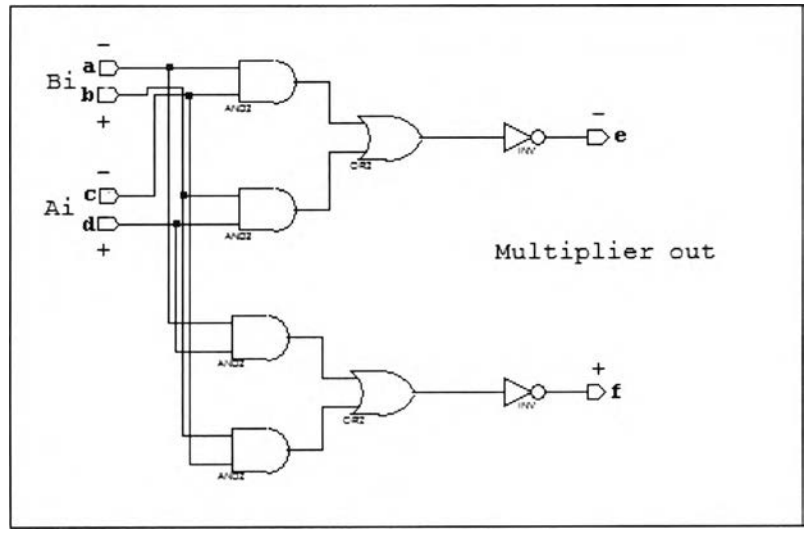
รูปที่ 3.12 มัลติพลิเคชั่น

โดยที่ภายใน multi แต่ละตัวจะทำการคูณข้อมูล 2 ดิจิตเข้าด้วยกัน มีสมการตรรกะดังนี้

$e = \overline{(a \wedge c) \vee (b \wedge d)}$

$f = \overline{(a \wedge d) \vee (b \wedge c)}$

มีรูปรายละเอียดของวงจรเซลตัวคูณดังนี้

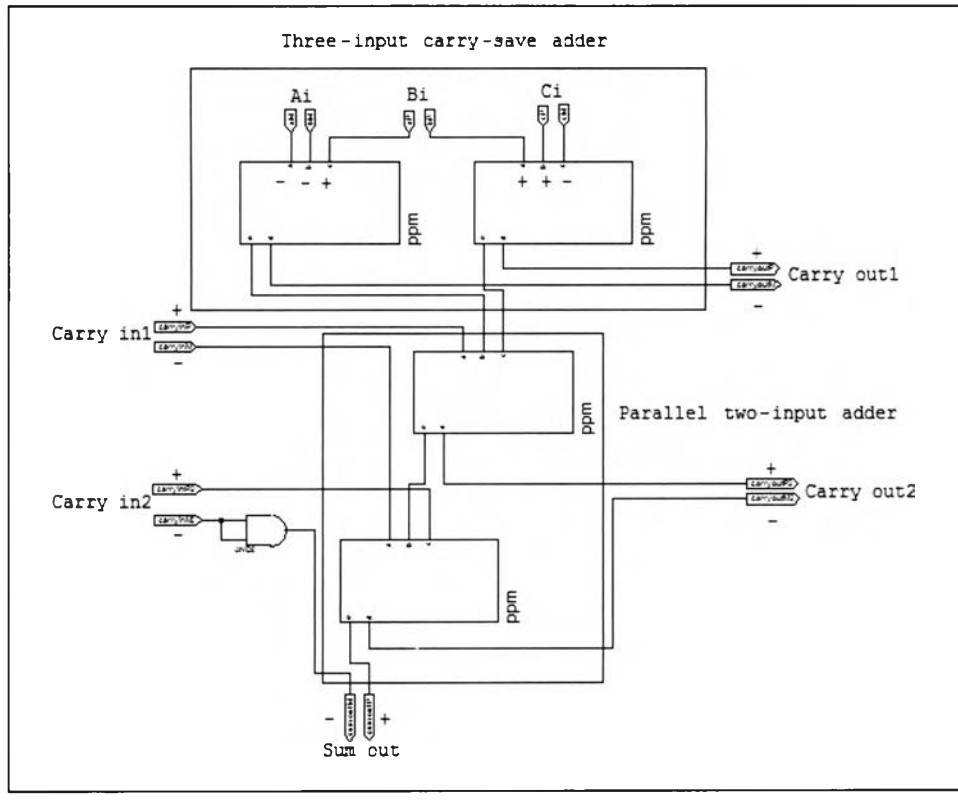


รูปที่ 3.13 เซลตัวคูณ

3) วงจรบวกแบบขนาน (Parallel adder) จะทำหน้าที่รวมผลที่ได้จากส่วนของ Multiplication เพื่อรวมเข้ากับตัวทด (carry in1, carry in2) และผลลัพท์ (sum in)จากตัวคูณดิจิตก่อนหน้า ซึ่งในส่วนนี้จะประกอบด้วยวงจร 2 ส่วนคือ

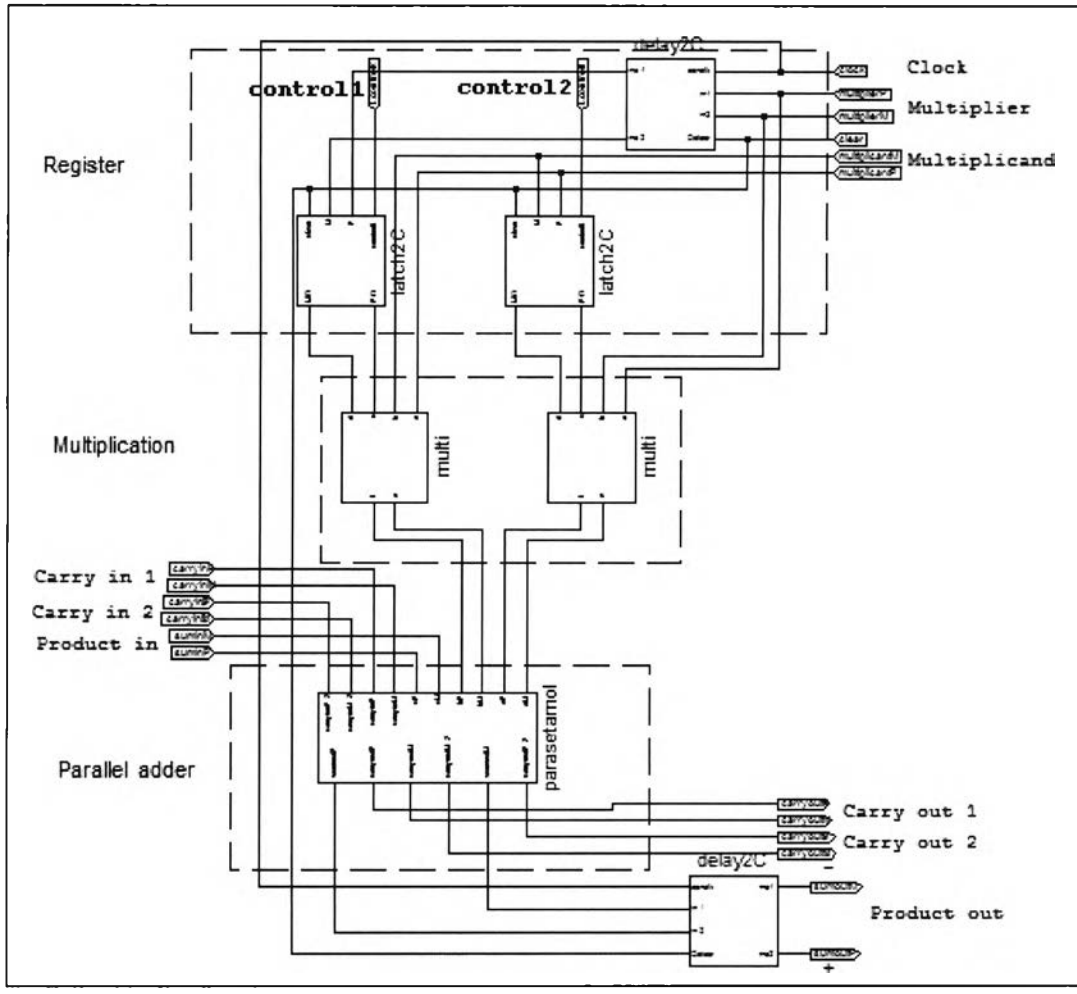
1) วงจรบวกแบบจำกัดตัวทดขนาด 3 ค่าป้อนเข้า (Three-input carry-save adder) ทำหน้าที่รวมผลที่ได้จากการคูณ 2 ค่ากับผลลัพท์ของดิจิตก่อนหน้าเข้าด้วยกัน

2) วงจรบวกแบบขนานขนาด 2 ค่าป้อนเข้า (Parallel two-input adcer) ทำหน้าที่รับผลลัพท์จากวงจรบวกแบบจำกัดตัวทด รวมเข้ากับ ตัวทด1 และ ตัวทด2



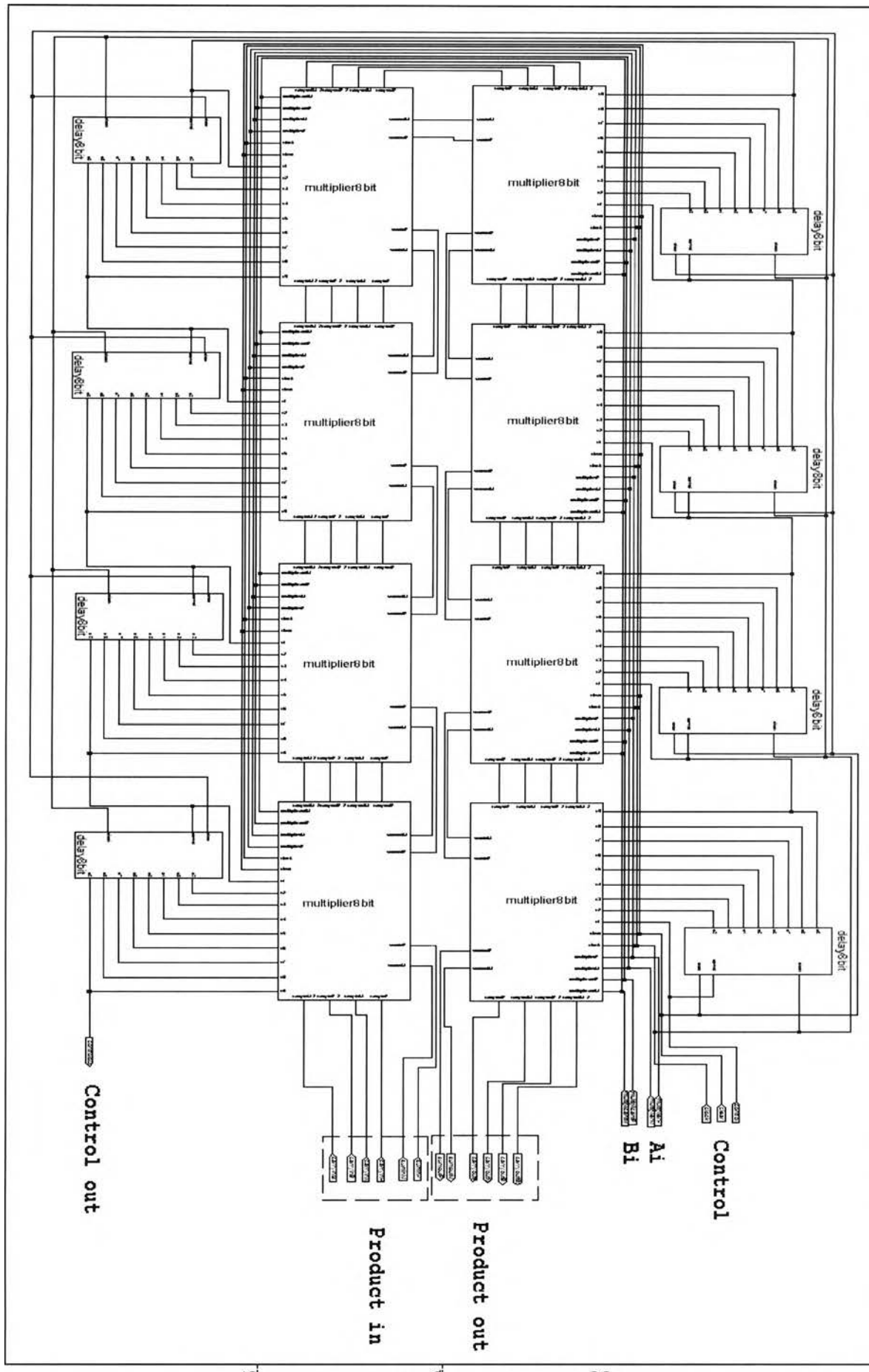
รูปที่ 3.14 วงจรบวกแบบขนาน

จากส่วนประกอบทั้ง 3 ที่ได้กล่าวมาแล้วเรานำมารวมกันเป็นวงจรคูณขนาด 1 ดิจิตได้ดังรูป 3.15 ซึ่งวงจรคูณที่ได้จะถูกควบคุมการทำงานจากขา control1 และ control2



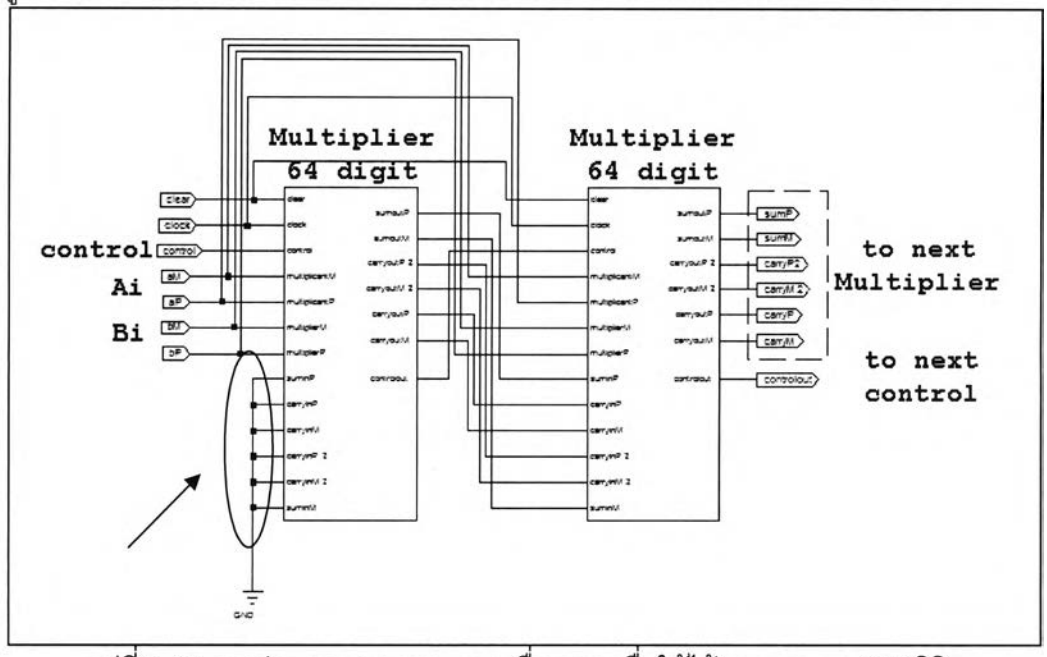
รูปที่ 3.15 วงจรคูณแบบเชื่อมตรงระดับดิจิต

จากวงจรคูณแบบเชื่อมตรงระดับดิจิตสามารถนำมาประยุกต์เป็นวงจรคูณแบบเชื่อมตรงระดับ 64 ดิจิต โดยนำวงจรคูณแบบเชื่อมตรงระดับดิจิต มาต่ออนุกรมขยายกันจำนวน 64 ชุด ซึ่งจากในรูปที่ 3.16 เราจะทำการรวมวงจรเป็นกลุ่ม โดยมี 8 กลุ่มกลุ่มละ 8 ดิจิตรวมเป็นวงจรคูณแบบเชื่อมตรงขนาด 64 ดิจิต เพื่อทำให้ง่ายต่อการแก้ไขปรับปรุง ต่อขยาย และ นำมาใช้งาน



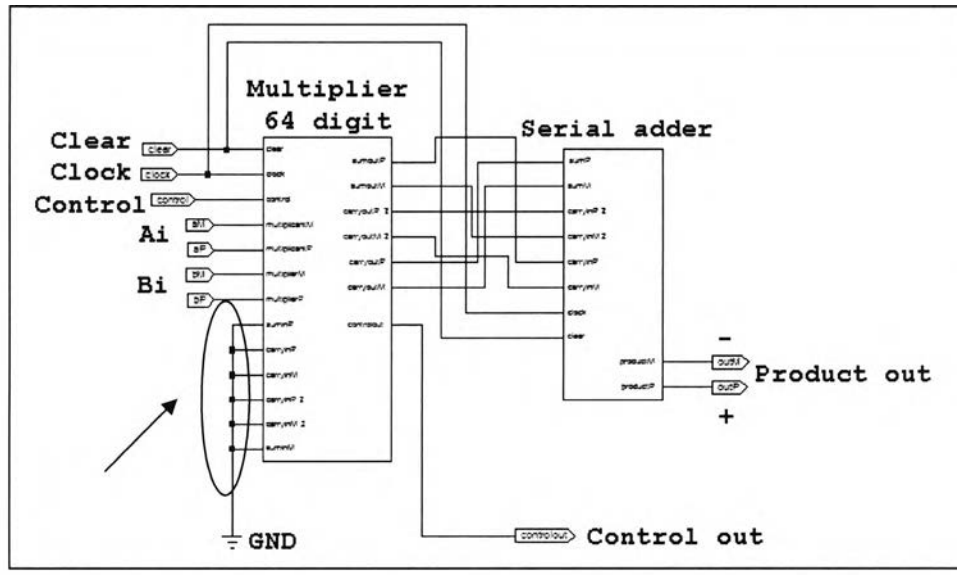
รูปที่ 3.16 วงจรคูณแบบเชื่อมตรงขนาด 64 ดิจิต

เนื่องจากวงจรคูณแบบเชื่อมตรงที่ได้ออกแบบนี้ มีคูณสมบัติการต่อขยายเพื่อที่จะรองรับการประมวลผลข้อมูลที่มีขนาด 128 ดิจิตได้ โดยการนำวงจรขนาด 64 ดิจิตสองตัวต่อเข้าด้วยกัน ดังรูป 3.17 ซึ่งหากต้องการมากกว่า 128 ดิจิตก็สามารถที่จะต่อเพิ่มได้อีกตามต้องการ



รูปที่ 3.17 การต่อขยายวงจรคูณแบบเชื่อมตรงเพื่อให้ได้ขนาดขนาด 128 ดิจิต

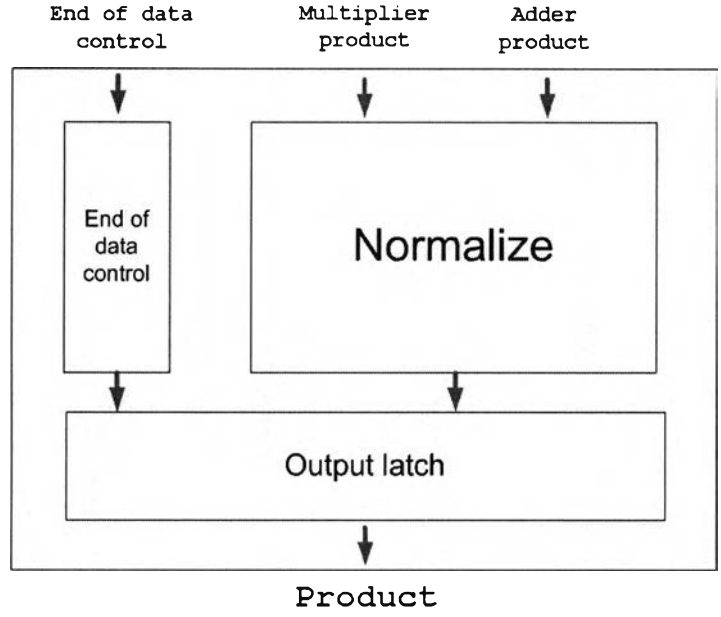
โดยที่ในวงจรคูณดิจิตสุดท้ายค่า Product in, Carry in1 และ Carryin2 จะต่อเข้ากับค่า 0 หรือ GND จุดที่ลูกศรชี้ในรูปที่ 3.17 และ 3.18 เมื่อได้ผลลัพท์วงจรคูณขนาด 64 ดิจิตข้างต้นแล้ว จึงส่งไปเข้าวงจร Serial adder เพื่อรวมค่า Product out, Carry out1 และ Carry out2 เข้าด้วยกัน ดังในรูปที่ 3.18 เพื่อที่จะคำนวณหาผลลัพท์สุดท้าย



รูปที่ 3.18 การเชื่อมต่อวงจรบวกแบบอนุกรมกับวงจรคูณแบบเชื่อมตรงขนาด 64 ดิจิต

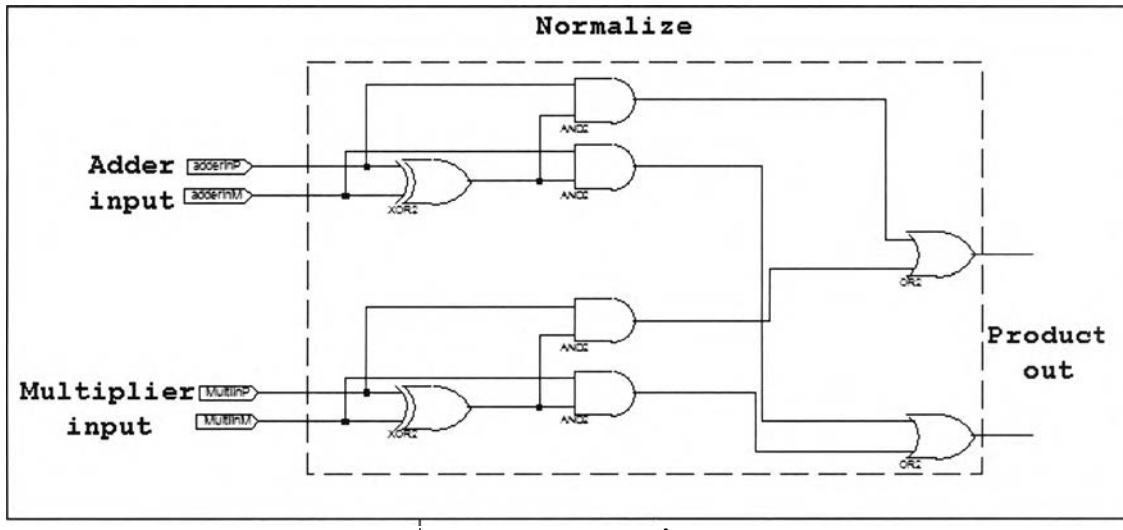
3.4 **หน่วยควบคุมสัญญาณขาออก** (Output Control Unit)

หน่วยควบคุมสัญญาณขาออกมีหน้าที่จัดการข้อมูลที่ออกจากตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์แบบเชื่อมตรง ให้เป็นรูปแบบที่ได้กำหนดไว้ในรูปแบบของสัญญาณข้างต้น และใส่ค่าที่บอกว่าเป็นการจบชุดของข้อมูลไว้ท้ายชุดของข้อมูลด้วย โดยที่จะประกอบด้วยหน่วยต่างๆดังรูปที่ 3.19



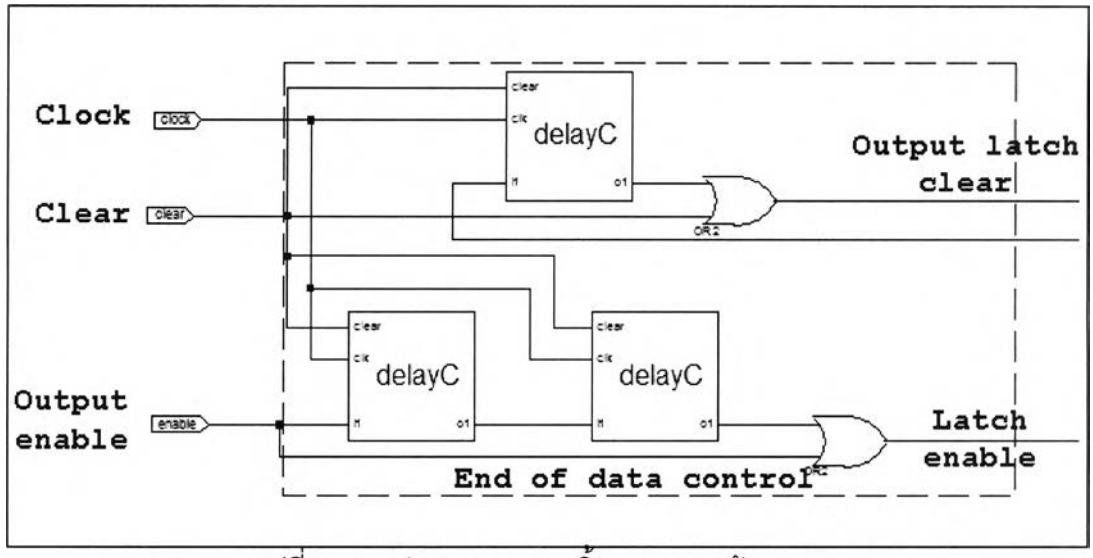
รูปที่ 3.19 หน่วยควบคุมสัญญาณขาออก

1. หน่วยปรับปรุงข้อมูล (Normalize) เมื่อได้ผลข้อมูลที่ประมวลผลเสร็จจากวงจรดำเนินการแบบเชื่อมตรงใดๆ (Adder product, Multiplier product) แล้ว เราจึงนำข้อมูลที่ได้ส่งเข้าไปทำการปรับปรุงข้อมูลภายในส่วนของหน่วยปรับปรุงข้อมูล โดยจะปรับข้อมูลที่มีค่าเป็น 1 ทั้งสองค่าให้เป็น 0 ทั้งสองค่า ดังรูป 3.20



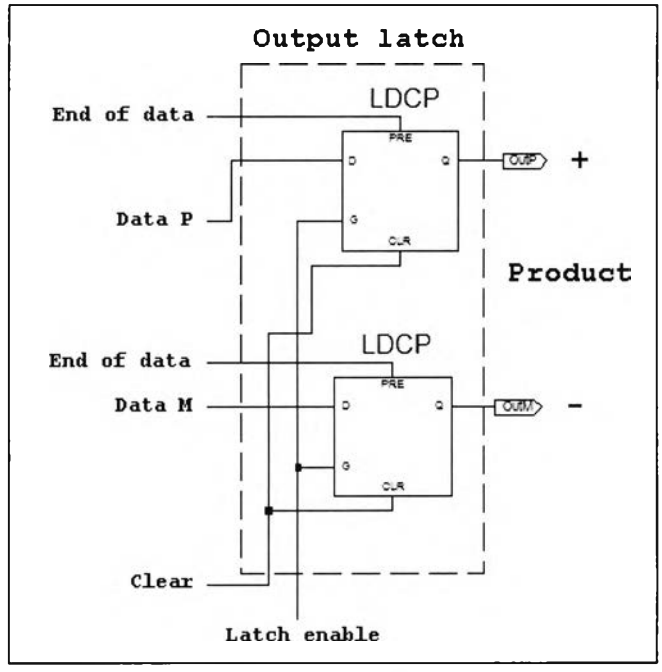
รูปที่ 3.20 หน่วยปรับปรุงข้อมูล

2. หน่วยควบคุมการสิ้นสุดของชุดข้อมูล (End of data control) จะทำหน้าที่ปิดเปิดหน่วยข้อมูลออกและส่งค่าเคลียร์ (Clear) เพื่อตั้งค่าหน่วยข้อมูลออกให้มีสถานะตั้งต้นหลังจากสิ้นสุดชุดของข้อมูลแล้ว ดังรูป 3.21



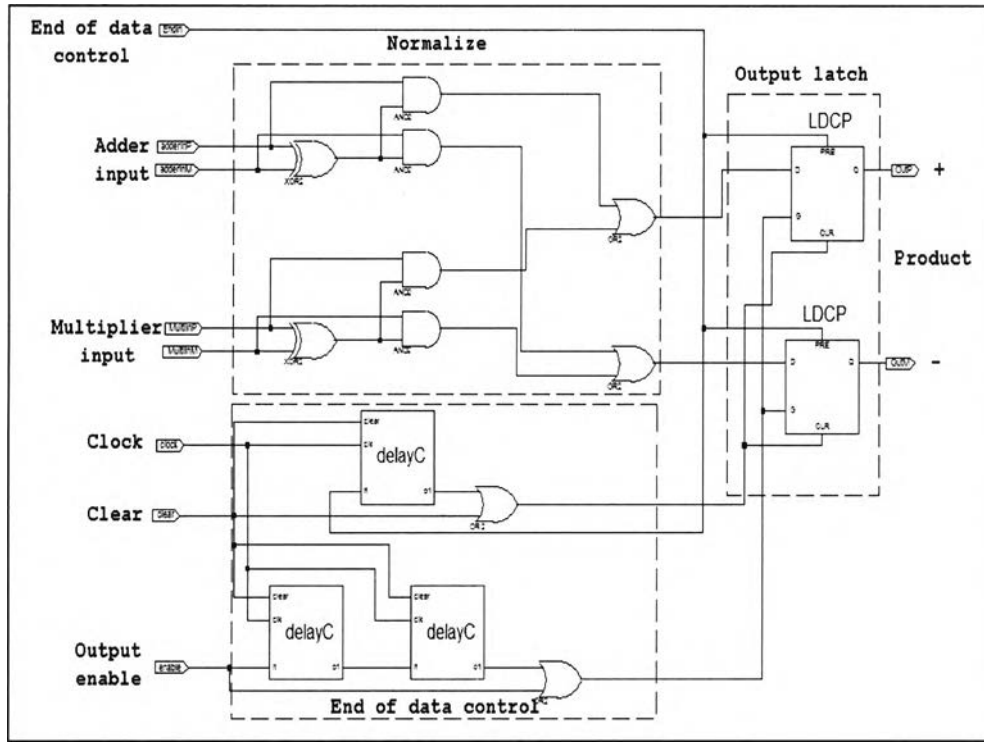
รูปที่ 3.21 หน่วยควบคุมการสิ้นสุดของชุดข้อมูล

3. หน่วยข้อมูลออก (Output latch) ประกอบด้วย SR Latch 2 ตัวจะรับสัญญาณการสิ้นสุดของข้อมูลจากหน่วยควบคุมสัญญาณขาเข้าโดยจะปรับค่าสุดท้ายหลังจากจบชุดของข้อมูลให้เป็น 1 ทั้งสองค่าโดยหน่วยข้อมูลออกเพื่อเป็นการบอกว่าจบชุดของข้อมูล และรับค่าเคลียร์เพื่อปรับค่าภายในให้เป็นสถานะตั้งต้น ดังรูป 3.22



รูปที่ 3.22 หน่วยควบคุมการสิ้นสุดของชุดข้อมูล

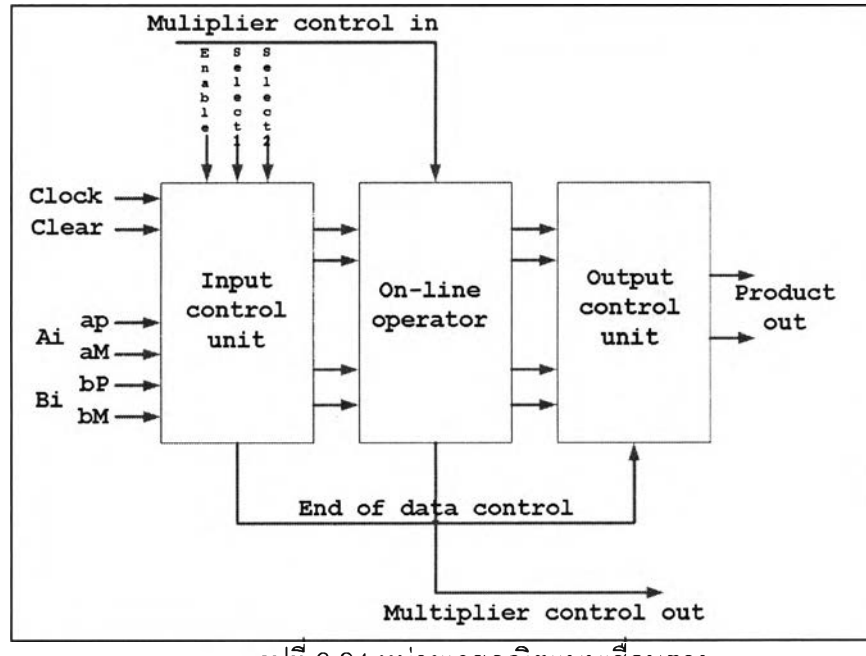
จากแนวการทำงานข้างต้นจึงนำมาออกแบบรวมเป็นวงจรควบคุมสัญญาณขาออกได้ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 วงจรควบคุมสัญญาณขาออก

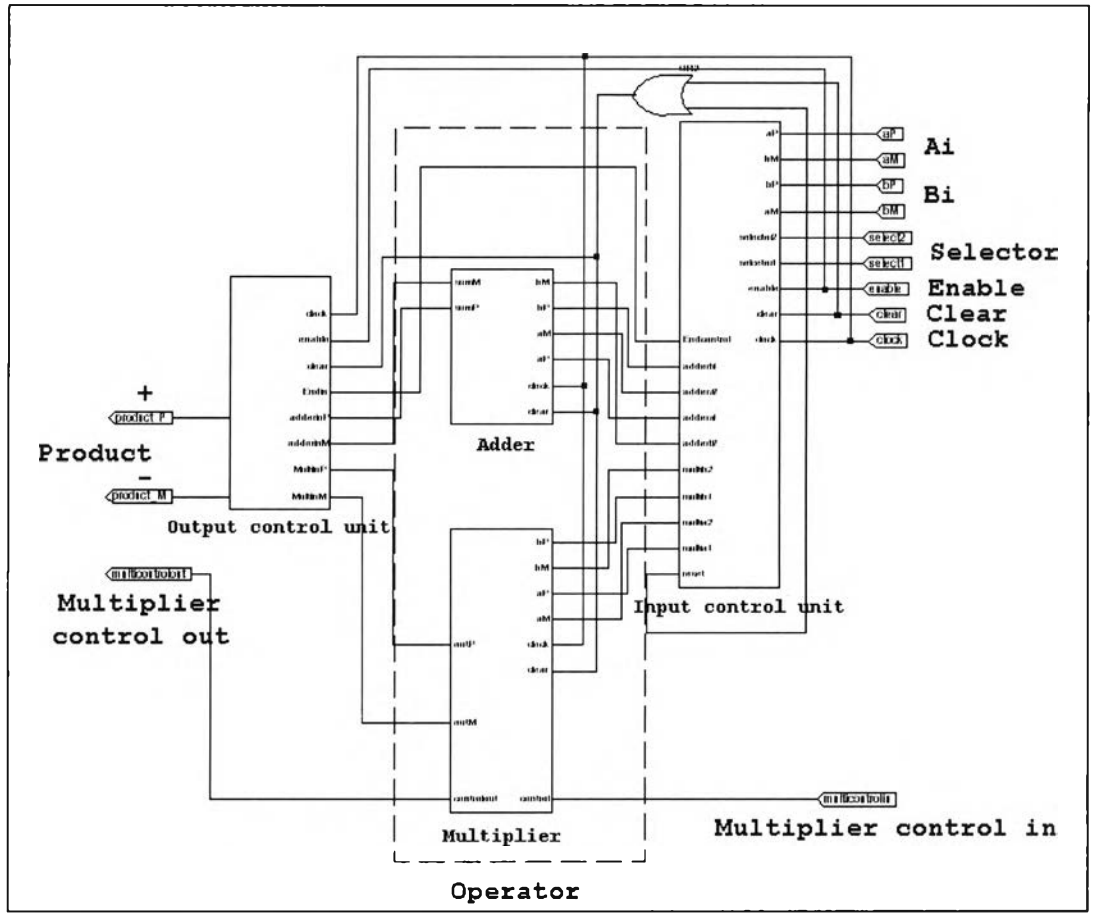
3.5 หน่วยเลขคณิตแบบเชื่อมตรง

หลังจากที่ได้วงจรครบทุกส่วนตามหัวข้อ 3.2, 3.3 และ 3.4 แล้วจึงนำมารวมกันเป็นหน่วยเลขคณิตแบบเชื่อมตรง ที่มีรูปแบบป้อนข้อมูล และสัญญาณควบคุมอยู่ในหัวข้อที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 3.24 หน่วยเลขคณิตแบบเชื่อมตรง

โดยได้ทำการออกแบบสร้างวงจรบนโปรแกรม Xilinx ISE Version 8.1i [7] ดังรูปที่ 3.25 เพื่อนำไปจำลองการทำงานและ ตรวจสอบความถูกต้องของผลการทำงานต่อไป



รูปที่ 3.25 รูปแบบโครงสร้างของวงจรหน่วยคณิตศาสตร์แบบเชื่อมตรง