

# บทที่ 4

## หน่วยความจำ

- 4.1 ประเภทของหน่วยความจำ
- 4.2 คุณสมบัติของหน่วยความจำ
- 4.3 ลำดับชั้นของหน่วยความจำ
- 4.4 หน่วยความจำหลัก
- 4.5 หน่วยความจำแคช
- 4.6 เทคโนโลยีของหน่วยความจำ
- 4.7 เอกสารอ้างอิงและเว็บไซต์ที่ควรรู้

### วัตถุประสงค์

- ประเภท คุณสมบัติ และลำดับชั้นของหน่วยความจำ
- โครงสร้างและการทำงานของหน่วยความจำหลัก
- โครงสร้างและการทำงานของหน่วยความจำแคช
- รู้จักเทคโนโลยีของหน่วยความจำแบบต่างๆ

**ห** หน่วยความจำหรือ Memory เป็นส่วนประกอบพื้นฐานของคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่ในการเก็บคำสั่งและข้อมูล คำสั่งหรือข้อมูลเหล่านี้ ไม่ว่าจะเป็นภาพ เสียง อักษร หรือตัวเลขใดๆ ก็ตามจะจัดเก็บอยู่ภายในคอมพิวเตอร์ในรูปแบบของเลขฐานสองเสมอ ซึ่งประกอบขึ้นจากเลข 0 หรือ 1 นั่นเอง เช่น ตัวอักษร A จะถูกแปลงเป็นเลขฐานสอง โดยมีค่าเท่ากับ '01000001' (เลข 65 ในฐานสิบ) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้บางครั้งเราเรียกภาษาที่เขียนด้วยเลขฐานสองนี้ว่าภาษาเครื่อง การแทนข้อมูลด้วยเลขฐานสองนี้จะสะดวกต่อการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานในรูปแบบของสวิตช์ ซึ่งมีได้ 2 สถานะ คือ ปิดและเปิด ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การที่คอมพิวเตอร์ประมวลผลตัวอักษร ภาพ หรือข้อมูลอื่นๆ ที่ไม่ใช่เลขฐานสองได้นั้น แท้ที่จริงแล้วคอมพิวเตอร์จะทำการแปลงข้อมูลเหล่านั้นให้อยู่ในเลขฐานสองก่อนแล้วจึงประมวลผล จึงเป็นที่มาของชื่อ **คอมพิวเตอร์** หรือ **เครื่องประมวลผลตัวเลข** นั่นเอง

#### 4.1 ประเภทของหน่วยความจำ

หน่วยความจำอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก ตามลักษณะการใช้งานหรือตำแหน่งที่ตั้งของหน่วยความจำนั้น ดังนี้

1. หน่วยความจำหลัก (main memory) เป็นหน่วยความจำหลักที่อยู่ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งซีพียูสามารถเข้าถึงได้โดยตรง มักจะเรียกว่า แรม (RAM) ซึ่งเป็นการเรียกตามวิธีการเข้าถึงข้อมูล ใช้เก็บข้อมูลและคำสั่งระหว่างการประมวลผล
2. หน่วยความจำแคช (cache) เป็นหน่วยความจำความเร็วสูง ใช้เก็บข้อมูลและคำสั่งในระหว่างที่ซีพียูประมวลผลเช่นเดียวกับหน่วยความจำหลัก ซีพียูสามารถเข้าถึงข้อมูลได้เร็วกว่าหน่วยความจำหลัก อาจอยู่ภายในซีพียูหรือภายนอกซีพียู
3. หน่วยความจำสำรอง (secondary memory) เป็นหน่วยความจำที่อยู่ภายนอกแผงวงจรหลัก เป็นที่พักข้อมูลระหว่างการทำงาน และใช้เก็บข้อมูลเวลาที่ปิดเครื่อง มีความเร็วต่ำกว่าหน่วยความจำสองประเภทแรก ได้แก่ สื่อบันทึกข้อมูล (storage device) ประเภทต่างๆ เช่น ฮาร์ดดิสก์ ซีดี การติดต่อระหว่างซีพียูกับอุปกรณ์เหล่านี้จะกระทำผ่านหน่วยควบคุมไอโอ (I/O controller)

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงหน่วยความจำสองประเภทแรกเท่านั้น ส่วนหน่วยความจำสำรองนั้น จะเป็นส่วนที่นักศึกษาศึกษาหาความรู้เพิ่มเติมด้วยตนเอง พร้อมทั้งนำเสนอหน้าชั้นเรียน

#### 4.2 คุณลักษณะของหน่วยความจำ

หน่วยความจำมีคุณลักษณะที่สำคัญหลายประการ การเลือกใช้หน่วยความจำให้เหมาะสมกับการใช้งานก็มักจะพิจารณาจากคุณลักษณะเหล่านี้ จึงจะขอกล่าวถึงรายละเอียดของแต่ละคุณลักษณะโดยสังเขป ดังนี้

**ตำแหน่งของหน่วยความจำ (location)** หมายถึงตำแหน่งที่ตั้งของหน่วยความจำ เช่น ภายในหรือภายนอกเครื่องคอมพิวเตอร์ **หน่วยความจำภายใน (internal memory)** โดยทั่วไปจะหมายถึง หน่วยความจำหลัก (main memory) ที่มักจะเรียกว่า แรม (RAM) หน่วยความจำแคชก็ถือเป็นรูปแบบหนึ่งของหน่วยความจำ

ภายใน หน่วยความจำภายนอก (External memory) หรือหน่วยความจำสำรอง (Secondary memory) จะหมายถึง อุปกรณ์รอบข้างจำพวกสื่อบันทึกข้อมูลที่ไม่รวมอยู่บนเมนบอร์ด เช่น ดิสก์ เทปแม่เหล็ก ซึ่งโปรเซสเซอร์สามารถเรียกใช้อุปกรณ์เหล่านี้ได้โดยผ่านหน่วยควบคุมไอโอ (I/O controller) นอกจากนี้ยังมีหน่วยความจำในซีพียูซึ่งอยู่ในรูปของรีจิสเตอร์อีกด้วย เนื่องจากซีพียูเองก็ต้องการหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลและคำสั่งไว้ภายในเช่นกัน

**ความจุ (Capacity)** เป็นคุณลักษณะที่เห็นได้ชัดเจนของหน่วยความจำ หน่วยวัดความจุโดยทั่วไปคือ ไบต์ (1 ไบต์ = 8 บิต) หรือ เวิร์ด ขนาดของเวิร์ดโดยทั่วไปอาจเป็น 8, 16 หรือ 32 บิต ส่วนความจุของหน่วยความจำภายนอกมักจะใช้หน่วยวัดเป็นไบต์

**หน่วยของการขนถ่ายข้อมูล (Unit of transfer)** เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความจุ สำหรับหน่วยความจำภายใน หน่วยของการขนถ่ายข้อมูลจะเท่ากับจำนวนสายสัญญาณข้อมูลที่เข้าออกหน่วยความจำหลัก โดยปกติจะมีขนาดเท่ากับเวิร์ด หรือบางครั้งอาจมีขนาดใหญ่กว่าเวิร์ด เช่น 64, 128 หรือ 256 บิต ขนาดของเวิร์ดนี้มักจะมีขนาดเท่ากับจำนวนบิตที่ใช้แทนตัวเลขและขนาดของคำสั่ง (Instruction length) แต่ก็มีกรณียกเว้นที่อาจมีขนาดไม่เท่ากัน หน่วยความจำภายนอกมักจะอ่านหรือบันทึกรหัสข้อมูลในปริมาณที่มากกว่าเวิร์ด เรียกว่า บล็อก (Block) การอ้างถึงตำแหน่งในหน่วยความจำหลัก จะอ้างถึงหน่วยที่เล็กที่สุด (addressable unit) บางระบบจะใช้หน่วยของเวิร์ด หลายๆ ระบบใช้หน่วยของไบต์ ขนาดของหน่วยความจำหลักที่อ้างอิงได้ทั้งหมด (N) จะสัมพันธ์กับจำนวนบิตที่ใช้ระบุตำแหน่งในหน่วยความจำ (n) เป็น  $2^n = N$  เสมอ

**วิธีการเข้าถึงข้อมูล (Method of accessing units of data)** สามารถแบ่งหน่วยความจำออกได้เป็น 4 ชนิด คือ

- การเข้าถึงแบบตามลำดับ (Sequential access) หน่วยความจำจัดถูกจัดเก็บในรูปของระเบียบ (Record) การเข้าถึงระเบียบจะเรียงตามลำดับก่อนหลัง ไม่สามารถเข้าถึงระเบียบที่อยู่หลังโดยไม่ผ่านระเบียบก่อนหน้า เวลาที่ใช้ในการเข้าถึงจึงไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลำดับของระเบียบที่ต้องการเข้าถึง ตัวอย่างเช่น เทปแม่เหล็ก ซึ่งเป็นหน่วยความจำภายนอกที่มักใช้ในการสำรองข้อมูล (Backup)
- การเข้าถึงโดยตรง (Direct access) แต่ละระเบียบหรือบล็อกจะมีตำแหน่งที่ชัดเจนบนหน่วยความจำ ทำให้สามารถเข้าถึง ณ ตำแหน่งที่ระบุได้โดยตรง เวลาที่ใช้ในการเข้าถึงไม่แน่นอนเช่นกัน เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการค้นหาแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งปัจจุบันที่หัวอ่านเขียนอยู่และตำแหน่งที่ต้องการเข้าถึง ตัวอย่างเช่น ดิสก์ ซึ่งเป็นหน่วยความจำภายในประเภทหนึ่ง
- การเข้าถึงแบบสุ่ม (Random access) ตำแหน่งของหน่วยความจำประเภทนี้จะกำหนดไว้ชัดเจนโดยลักษณะทางกายภาพ เวลาในการเข้าถึง ณ ตำแหน่งใดๆ จะเป็นค่าคงที่เท่ากันเสมอ ไม่ขึ้นกับลำดับหรือตำแหน่งของข้อมูลที่เข้าถึงก่อนหน้า ตัวอย่างเช่น หน่วยความจำหลัก ที่มักเรียกว่าแรม (RAM – Random Access Memory) เพราะจะมีการเข้าถึงแบบสุ่มนั่นเอง ซึ่งทำให้สามารถเลือกตำแหน่งใดๆ หน่วยความจำได้โดยการสุ่ม และสามารถระบุและเข้าถึงตำแหน่งนั้นได้โดยตรง หน่วยความจำแคชในบางระบบก็ใช้การเข้าถึงแบบสุ่มด้วยเช่นกัน

- การเข้าถึงแบบรวม (Associative) เป็นหน่วยความจำแบบสุ่มประเภทหนึ่งซึ่งสามารถเปรียบเทียบบิตของข้อมูลที่อยู่ภายในเวิร์ดได้ ตัวอย่างเช่น หน่วยความจำแคช ที่ทำงานโดยการค้นหาข้อมูลที่ต้องการ โดยการเปรียบเทียบข้อมูลที่ค้นหาในทุกเวิร์ดของหน่วยความจำพร้อมๆ กัน แทนที่จะค้นหาโดยใช้การระบุตำแหน่งของเวิร์ด เวลาที่ใช้ในการเข้าถึงข้อมูลจึงคงที่เช่นเดียวกับการเข้าถึงข้อมูลแบบสุ่ม

**ประสิทธิภาพ (Performance)** เป็นอีกหนึ่งคุณลักษณะที่สำคัญซึ่งใช้ในการพิจารณาเลือกซื้อหน่วยความจำ ปัจจัยสำคัญที่ใช้วัดประสิทธิภาพ ได้แก่

- เวลาที่ใช้ในการเข้าถึงข้อมูล (Access time – latency) ในกรณีของแรม จะเป็นเวลาที่ใช้ในการอ่านหรือเขียนข้อมูล โดยจะเริ่มต้นนับจากเวลาที่ระบุตำแหน่งให้กับหน่วยความจำ จนกระทั่งถึงเวลาที่ข้อมูลพร้อมใช้ สำหรับหน่วยความจำประเภทอื่น เวลาในการเข้าถึงจะหมายถึง ระยะเวลาที่ใช้เคลื่อนย้ายกลไกในการอ่านเขียนข้อมูลไปยังตำแหน่งที่ต้องการ
- วงรอบของหน่วยความจำ (Memory cycle time) ใช้กับกรณีของแรมเท่านั้น โดยระยะเวลาวงรอบหนึ่งจะประกอบด้วย ระยะเวลาในการเข้าถึงหน่วยความจำ (access time) บวกกับระยะเวลาอื่นๆ ที่จำเป็นต้องใช้ เช่น ระยะเวลาที่รอให้สัญญาณต่างๆ เข้าสู่สถานะที่พร้อมใช้งาน ระยะเวลาที่รอสายสัญญาณเข้าสู่สถานะว่าง หรือระยะเวลาที่ใช้ในการสร้างสัญญาณข้อมูลขึ้นมาใหม่ ซึ่งระยะเวลาเหล่านี้มักจะเกี่ยวข้องกับบัลลูนหลักของระบบ
- อัตราเร็วในการขนถ่ายข้อมูล (Transfer rate) หมายถึง เวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลของหน่วยความจำ โดยมากจะมีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที (bps – bit per second) กรณีของแรม ระยะเวลาหนึ่งจะมีค่าเท่ากับ  $1/(\text{cycle time})$

**ลักษณะทางกายภาพ (Physical type)** สามารถใช้แบ่งหน่วยความจำออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ตามเทคโนโลยีที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลหน่วยความจำ ได้แก่ หน่วยความจำประเภทสารกึ่งตัวนำ เช่น แรมชนิดต่างๆ และแคช หน่วยความจำประเภทแม่เหล็ก (Magnetic surface memory) เช่น ดิสก์และเทป หน่วยความจำประเภทแสง เช่น ซีดีและดีวีดี เป็นต้น

คุณสมบัติทางกายภาพของอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล (Physical characteristics of data storage) ก็มีความสำคัญต่อการเลือกใช้งาน โดยจะแบ่งตามสองคุณสมบัติหลัก คือ ความคงทนถาวรของข้อมูลที่ถูกเก็บและความสามารถในการลบข้อมูลในหน่วยความจำ ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

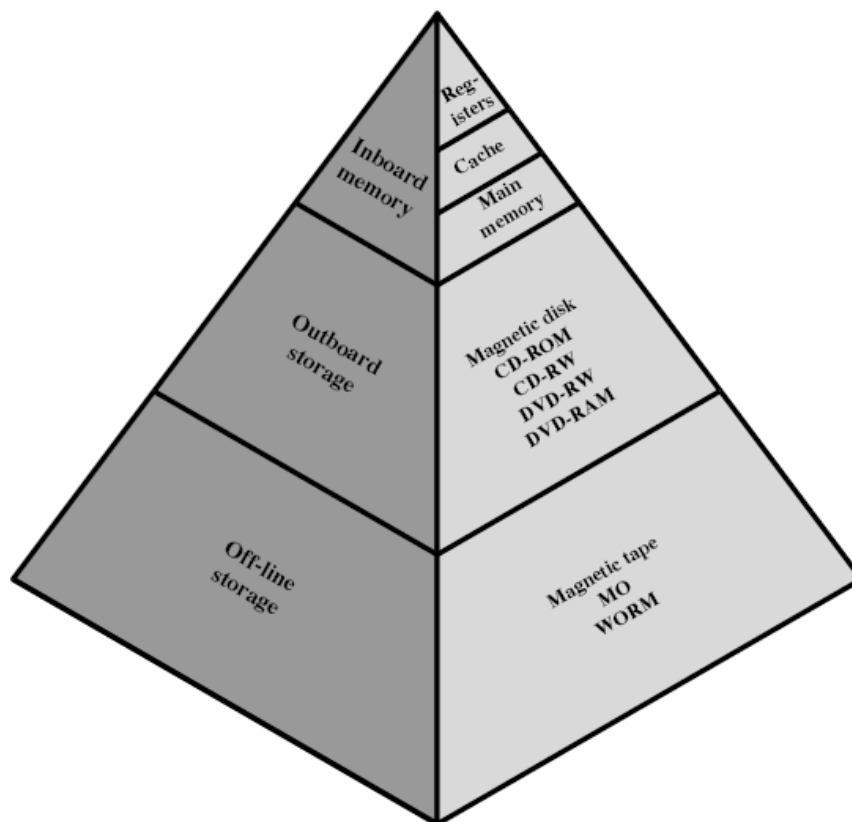
- แบบชั่วคราว (Volatile) ซึ่งข้อมูลจะสูญหายหากขาดกระแสไฟฟ้ามาหล่อเลี้ยง ได้แก่ หน่วยความจำหลักหรือแรม
- แบบถาวร (Non-volatile) จะเก็บข้อมูลไว้ได้ตลอดเวลาโดยไม่ต้องมีกระแสไฟฟ้ามาหล่อเลี้ยง เช่น หน่วยความจำประเภทแม่เหล็กและประเภทแสง
- แบบลบได้ (Erasable) คือสามารถบันทึกได้หลายๆ ครั้ง เช่น แรม ดิสก์ เทป
- แบบลบไม่ได้ (Nonerasable) เมื่อบันทึกข้อมูลลงไปแล้วจะไม่สามารถแก้ไขหรือลบทิ้งได้ สามารถอ่านได้อย่างเดียว จึงเรียกว่า **รอม (ROM – Read Only Memory)** ซึ่งหน่วยความจำประเภทนี้จะต้องเป็นหน่วยความจำแบบถาวรด้วย จึงจะสามารถเก็บข้อมูลไว้ได้ตลอดเวลา

สำหรับกรณีของแรมแล้ว โครงสร้าง (Organization) ในการจัดเรียงบิตให้อยู่ในรูปเวิร์ดก็เป็นอีกคุณลักษณะหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบหน่วยความจำ

### 4.3 ลำดับชั้นของหน่วยความจำ

หน่วยความจำแบ่งออกได้เป็นหลายระดับ ดังแสดงในรูป 4.1 โดยสามารถจัดแบ่งกลุ่มออกเป็นระดับตามตำแหน่งที่ตั้งและลักษณะเฉพาะบางอย่าง จากรูปจะแบ่งระดับตามตำแหน่งที่ตั้งเป็น 3 ระดับด้วยกัน โดยตำแหน่งสูงสุด จะเป็นหน่วยความจำที่อยู่ภายในเมนบอร์ด ได้แก่ รีจิสเตอร์ แคช และหน่วยความจำหลัก ลำดับถัดมาคือ หน่วยความจำที่อยู่ภายนอกเมนบอร์ด ได้แก่ สื่อบันทึกข้อมูลประเภทดิสก์ ซีดี และดีวีดี และตำแหน่งล่างสุดเป็นหน่วยความจำแบบออฟไลน์ ได้แก่ สื่อบันทึกข้อมูลประเภทเทปแม่เหล็ก ประเภทที่ใช้แม่เหล็กและแสง และวอร์ม เมื่อพิจารณาหน่วยความจำในพีระมิดจากบนลงล่างจะพบว่า ราคาต่อบิตจะต่ำลง ความจุมากขึ้น เวลาในการเข้าถึงข้อมูลเพิ่มขึ้น และความเร็วในการเข้าถึงของโปรเซสเซอร์ลดลง นอกจากนี้จะสังเกตเห็นความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

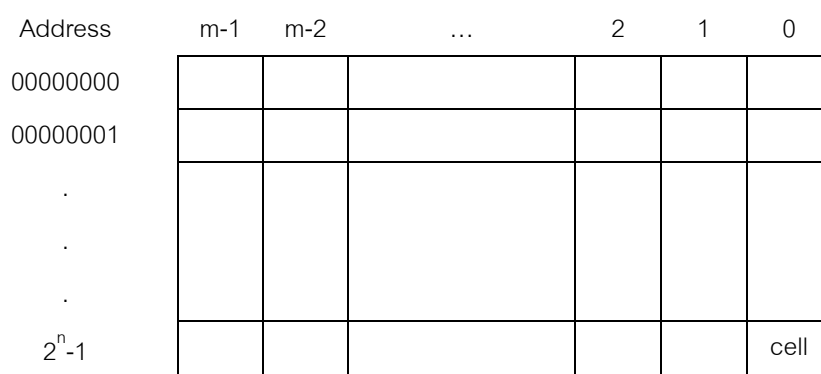
- เวลาในการเข้าถึงเร็วขึ้น จะทำให้ราคาต่อบิตเพิ่มขึ้น
- ความจุที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ราคาต่อบิตลดลง
- ความจุที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ใช้เวลาในการเข้าถึงนานขึ้นด้วย



รูปที่ 4.1 ลำดับชั้นของหน่วยความจำ

## 4.4 หน่วยความจำหลัก

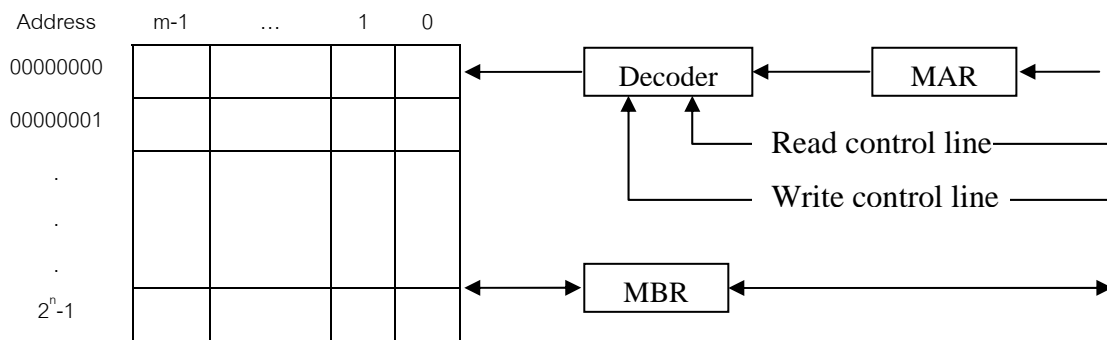
หน่วยความจำหลักประกอบด้วยหน่วยย่อยหรือเซลล์ (Cell) จำนวนมาก แต่ละเซลล์จะมีหมายเลขประจำตำแหน่งเพื่อใช้ในการอ้างอิงถึง เรียกว่า ตำแหน่งหรือแอดเดรส (address) แต่ละเซลล์จะเก็บข้อมูลอยู่ในรูปเลขฐานสองหรือบิตที่มีค่า 0 หรือ 1 นั้นเอง ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อน การอ้างอิงถึงแอดเดรสจะใช้บิตจำนวนหนึ่ง (n) ในการอ้างอิง ซึ่งมักจะสัมพันธ์กับจำนวนสายสัญญาณตำแหน่ง (address lines) ของบัสระบบ ดังนั้นตำแหน่งของหน่วยความจำที่อ้างอิงได้จะมีค่าเป็น  $2^n$  เช่น ถ้า n มีขนาด 8 บิต ก็จะสามารถอ้างอิงหน่วยความจำได้สูงสุด  $2^8 = 256$  ตำแหน่ง คือตำแหน่งที่  $(00000000)_2$  ถึงตำแหน่งที่  $(11111111)_2$  หรือเขียนอยู่ในรูปเลขฐานสิบก็คือตำแหน่งที่  $(0)_{10}$  ถึงตำแหน่ง  $(255)_{10}$  การเข้าถึงหน่วยความจำการอ้างอิงตำแหน่งในหน่วยความจำหลักจะอ้างอิงหน่วยอ้างอิงที่เล็กที่สุด (m) ซึ่งส่วนใหญ่จะมีขนาดเท่ากับหน่วยของเวิร์ด การอ่านและบันทึกข้อมูลลงในหน่วยความจำจะกระทำกับหน่วยอ้างอิงนี้ นั่นคือกระทำครั้งละ m บิต รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างเชิงตรรกะของหน่วยความจำหลัก



รูป 4.2 โครงสร้างเชิงตรรกะของหน่วยความจำหลัก

ลักษณะทางกายภาพของหน่วยความจำหลักหรือแรม แสดงดังรูปในเอกสารที่แนบต่อท้ายบทนี้ และยังแสดงให้เห็นถึงการทำงานของแรมเมื่อมีการอ่านและบันทึกข้อมูลอีกด้วย ในรูปนั้นจะเป็นการทำงานของแรมร่วมกับบัสหลักเพียงอย่างเดียวโดยไม่ได้แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนที่ต้องติดต่อกับซีพียู

ในการประมวลผลโปรแกรม หน่วยความจำต้องมีการติดต่อกับซีพียูเสมอ โดยเมื่อซีพียูต้องการอ่านและบันทึกข้อมูลในหน่วยความจำ หน่วยควบคุมจะส่งสัญญาณควบคุมผ่านทางสายสัญญาณควบคุมการอ่านหรือเขียน (read/write control lines) และภายในหน่วยซีพียูเองจำเป็นต้องมีรีจิสเตอร์เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลระหว่างการทำงาน โดยจะใช้ รีจิสเตอร์สองตัว โดยตัวหนึ่งทำหน้าที่ในการเก็บตำแหน่งหน่วยความจำที่ต้องการใช้งาน เรียกว่า MAR (Memory Address Register) และอีกตัวหนึ่งทำหน้าที่ในการเก็บข้อมูลที่จะอ่านหรือบันทึกในหน่วยความจำ เรียกว่า MBR (Memory Buffer Register) ขนาดของ MBR จะมีขนาดเท่ากับหน่วยอ้างอิงที่เล็กที่สุด คือ m บิต และมี decoder ทำหน้าที่ในการแปลงแอดเดรสเป็นตำแหน่งที่แท้จริงในหน่วยความจำ รูป 4.3 แสดงโครงสร้างของหน่วยความจำและส่วนประกอบของซีพียูที่ใช้ในการอ่านและบันทึกข้อมูล



รูป 4.3 โครงสร้างของหน่วยความจำและซีพียูที่ใช้ในการอ่านและบันทึกข้อมูล

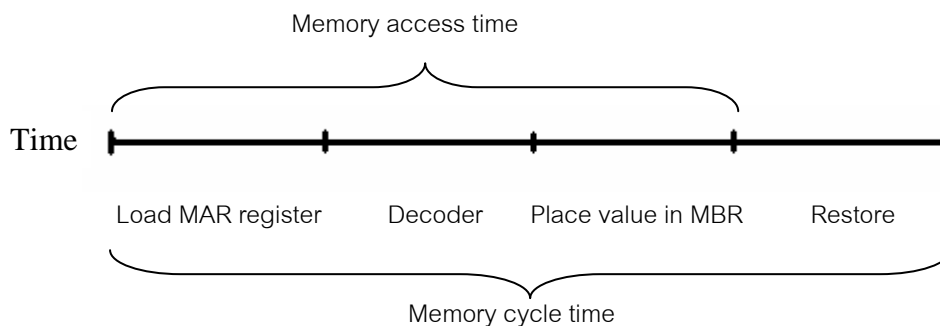
ขั้นตอนการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำ มีดังนี้

1. นำแอดเดรสของข้อมูลไปเก็บไว้ใน MAR
2. ส่งสัญญาณการอ่านผ่านทาง Read control line
3. decoder ทำการแปลงแอดเดรสใน MAR ให้เป็นตำแหน่งจริงในหน่วยความจำ
4. อ่านข้อมูลจากหน่วยความจำไปเก็บไว้ใน MBR

ขั้นตอนการเขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำ มีดังนี้

1. นำแอดเดรสของข้อมูลไปเก็บไว้ใน MAR
2. นำข้อมูลที่จะบันทึกลงหน่วยความจำไปเก็บไว้ใน MBR
3. ส่งสัญญาณการบันทึกผ่านทาง Write control line
4. decoder ทำการแปลงแอดเดรสใน MAR ให้เป็นตำแหน่งจริงในหน่วยความจำ
5. บันทึกข้อมูลที่อยู่ใน MBR ลงในหน่วยความจำ

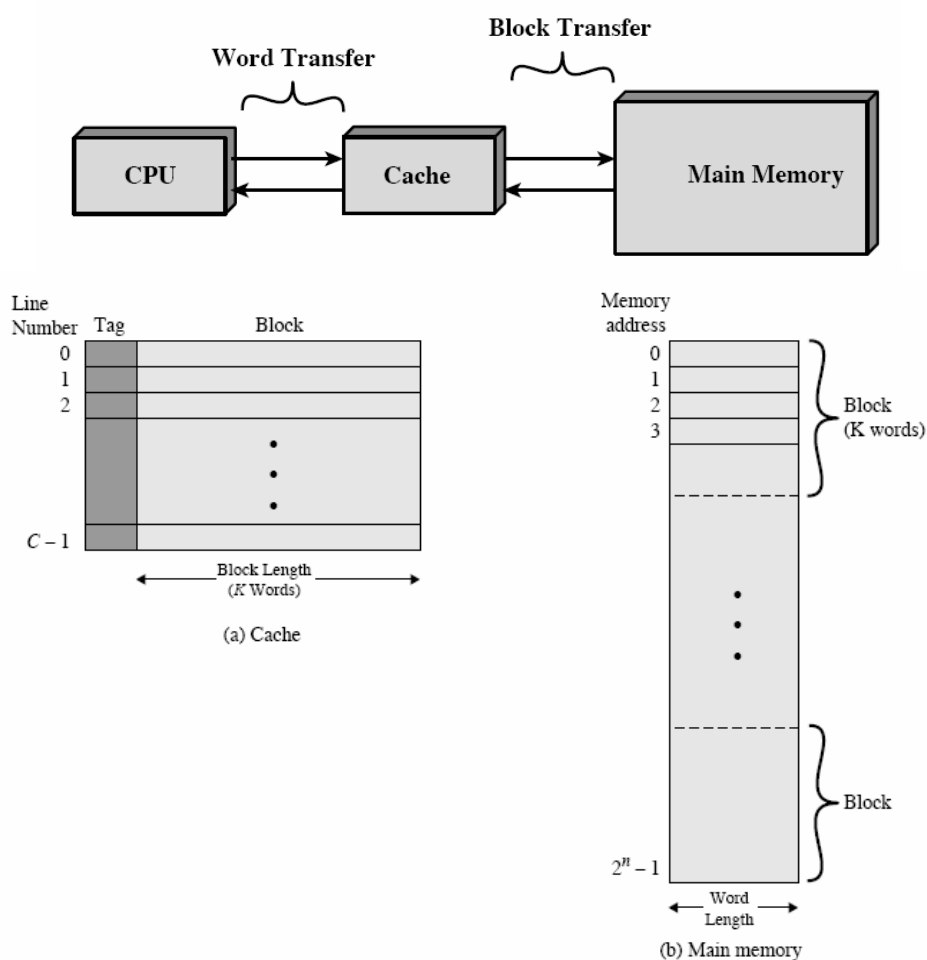
วงรอบของหน่วยความจำ จะรวมถึงเวลาในเวลาที่ใช้ในการเข้าถึงหน่วยความจำ ซึ่งเริ่มตั้งแต่การนำแอดเดรสไปเก็บไว้ใน MAR จนกระทั่งบันทึกค่าลงหรืออ่านค่ามาไว้ที่ MBR เมื่อมีการเข้าถึงข้อมูลในหน่วยความจำ สถานะของข้อมูลอาจเปลี่ยนแปลงไป จึงต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งเพื่อทำให้มีสภาพดั้งเดิม (restore) เพื่อให้พร้อมใช้งานครั้งต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เวลาที่ใช้ในการเข้าถึงและวงรอบของหน่วยความจำ

## 4.5 หน่วยความจำแคช

หน่วยความจำแคชเป็นหน่วยความจำชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับเก็บพักข้อมูลที่มีการใช้งานบ่อยๆ โดยซีพียูจะสามารถเข้าถึงข้อมูล และโอนถ่ายข้อมูลได้รวดเร็วกว่าหน่วยความจำหลัก หลักการทำงานของหน่วยความจำแคช คือ เป็นหน่วยความจำขนาดเล็กที่มีความเร็วสูงทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างซีพียูกับหน่วยความจำหลัก โดยพยายามให้ซีพียูทำงานได้อย่างรวดเร็วด้วยการติดต่อกับหน่วยความจำหลักให้น้อย นั่นคือ ซีพียูจะทำการดึงข้อมูลที่มีความคาดว่าจะมีการเรียกใช้งานบ่อยๆ จากหน่วยความจำหลักเข้ามาเก็บไว้ในหน่วยความจำแคช เมื่อซีพียูต้องการใช้ข้อมูลก็จะค้นหาที่หน่วยความจำแคชก่อน หากพบข้อมูล (เรียกว่า cache hit) ก็ไม่จำเป็นต้องติดต่อกับหน่วยความจำหลัก ทำให้ทำงานได้รวดเร็วว่าการไปค้นหาในหน่วยความจำหลักโดยตรง ในกรณีไม่พบข้อมูล (เรียกว่า cache miss) ก็จะคัดลอกข้อมูลจากหน่วยความจำที่ต้องการจำนวนหนึ่งบล็อก (Block) มาเก็บไว้ในหน่วยความจำแคช แล้วจึงส่งต่อจากแคชไปยังซีพียู โครงสร้างของหน่วยความจำแคชจะมีแท็ก (Tag) สำหรับแต่ละบล็อกเก็บไว้เพื่อระบุว่าเป็นข้อมูลในแคชช่องนั้นนำมาจากบล็อกใด ดังแสดงในรูป 4.5 ขั้นตอนการทำงานของหน่วยความจำแคชแสดงดังรูปในเอกสารที่แนบท้ายบทนี้



รูปที่ 4.5 โครงสร้างของหน่วยความจำแคชและหน่วยความจำหลัก

ข้อมูลในแคชจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากการทำงานของซีพียู ดังนั้นการออกแบบขั้นตอนการแทนที่ข้อมูลในหน่วยความจำแคชก็เป็นประเด็นสำคัญ วิธีการแทนที่ข้อมูลในแคชทำได้หลายวิธี เช่น



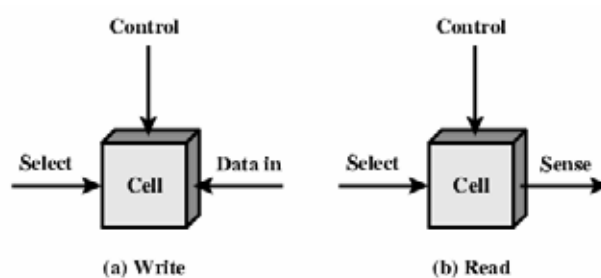
แบบแทนที่บล็อกในพื้นที่ที่เพิ่งเรียกใช้งาน (LRU – Least Recently Used) แบบเข้าก่อนออกก่อน (FIFO – First In First Out) แบบแทนที่บล็อกที่ใช้งานน้อยที่สุด (LFU – Least Frequently Used) หรือแบบสุ่ม

หน่วยความจำแคชเริ่มนำมาใช้ในคอมพิวเตอร์ตั้งแต่ซีพียูรุ่น 80486 โดยมีขนาดเริ่มต้นที่ 8 KB ต่อมาได้มีการพัฒนาให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและนำไปไว้ในชิปของซีพียู จึงทำให้ระยะทางระหว่างซีพียูกับแคชลดลง ทำให้ทำงานได้เร็วมากขึ้น ต่อมาในการนำแคชซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า แต่ทำงานได้ช้ากว่ามาใช้ในอีกระดับหนึ่ง โดยใส่ไว้ในเมนบอร์ด จึงทำให้แบ่งแคชออกเป็น 2 ระดับตามลำดับหรือและตำแหน่งที่เรียกใช้งาน โดยเรียกแคชที่อยู่ในชิปของซีพียูว่า แคชภายใน (Internal cache) หรือแคชระดับ 1 (L1 – Level 1 cache) และเรียกแคชที่อยู่บนเมนบอร์ดว่าแคชภายนอก (External cache) หรือแคชระดับ 2 (L2 – Level 2 cache) ซึ่งมีหน้าที่คอยส่งข้อมูลไปยัง L1 อีกทีหนึ่ง ในซีพียูรุ่นเพนเทียมเองยังได้แบ่งแคชภายในออกเป็น 2 ส่วนเพื่อแยกการทำงานกัน โดยชุดหนึ่งจะใช้เก็บคำสั่ง เรียกว่า แคชคำสั่ง (Instruction cache) ส่วนอีกชุดหนึ่งจะใช้เก็บข้อมูลเรียกว่า แคชข้อมูล (Data cache)

หลักการทำงานของแคชนี้ ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทำงานอื่นๆ ด้วยเช่น ดิสก์แคช ซึ่งจะทำให้การอ่านข้อมูลที่ต้องการใช้งานจากดิสก์เข้ามาเก็บไว้ที่หน่วยความจำหลักก่อน เมื่อซีพียูต้องการใช้งานก็จะเข้าไปค้นหาในหน่วยความจำหลักก่อน หากไม่พบจึงไปค้นหาในดิสก์ต่อไป หรือแคชในโปรแกรมเบราเซอร์ซึ่งใช้เก็บเว็บเพจที่เป็นที่นิยม เมื่อมีการเรียกใช้เว็บเพจนั้น เบราเซอร์ก็จะไปค้นหาในแคชก่อน หากพบก็จะดึงเว็บเพจนั้นขึ้นมาแสดงผลได้อย่างรวดเร็วกว่าการดึงข้อมูลมาจากอินเทอร์เน็ตโดยตรง

## 4.6 เทคโนโลยีของหน่วยความจำ

หน่วยความจำที่ใช้ในยุคแรกจะสร้างขึ้นจากวงแหวนแม่เหล็ก ต่อมาได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำที่ทำงานได้รวดเร็วขึ้น ขนาดเล็กลง เพื่อนำมาประกอบเป็นหน่วยความจำหลักของเครื่องพีซี และใช้มาจนถึงปัจจุบัน หน่วยที่เล็กที่สุดของสารกึ่งตัวนำก็คือ เซลล์หน่วยความจำ ที่ถูกบรรจุอยู่ในชิปไอซีที่มีรูปร่างและความจุแตกต่างกัน ซึ่งเซลล์เหล่านี้มีความหลากหลายพอสมควร แต่จะมีคุณสมบัติพื้นฐานที่เหมือนกัน คือ สามารถเปลี่ยนสถานะที่เสถียรได้ 2 สถานะ จึงนำมาใช้แทนบิตที่มีค่า 0 หรือ 1 ได้ และสามารถถูกตรวจสอบสถานะ (อ่าน) หรือทำให้เปลี่ยนสถานะได้ (บันทึก)



รูป 4.6 การทำงานของเซลล์หน่วยความจำ

รูป 4.6 แสดงการทำงานของเซลล์หน่วยความจำ โดยทั่วไปเซลล์จะมีสัญญาณเชื่อมต่อ 3 ส่วนคือ

- select ทำหน้าที่เลือกเซลล์ที่จะอ่านหรือบันทึกสถานะ
- sense/data-in สำหรับการบันทึก จะใช้ sense ทำหน้าที่เป็นตัวนำสัญญาณเข้ามาเปลี่ยนสถานะของเซลล์ให้เป็น 0 หรือ 1 สำหรับการอ่านจะใช้ data-in ทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณที่ตรงกับสถานะของเซลล์เพื่อนำไปใช้งาน
- control เป็นสัญญาณควบคุมที่สั่งให้อ่านหรือบันทึกข้อมูลกับเซลล์ที่เลือก

หน่วยความจำแบบสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทตามคุณลักษณะ ดังแสดงในตาราง 4.1 ในที่นี้จะขอลำถึงหน่วยความจำ 2 ประเภทหลัก คือ รอมและแรม ซึ่งมีการทำงานโดยเข้าถึงแบบสุ่มเหมือนกัน โดยรอมจะบันทึกข้อมูลแบบถาวร ซึ่งเป็นโปรแกรมและข้อมูลที่ใช้ในการเริ่มต้นการทำงานของคอมพิวเตอร์ ส่วนแรมจะเปรียบเสมือนกระดานหมากรุกขนาดใหญ่ที่ซีพียูใช้ในการจัดบันทึกข้อมูลชั่วคราวขณะทำงานและข้อมูลเหล่านี้จะหายไปเมื่อปิดเครื่อง

MEMORY TYPE	CATEGORY	ERASURE	WRITE MECHANISM	VOLATILITY
Ramdom-access memory (RAM)	Read-write memory	Electrically, byte level	Electrically	Volatile
Read-only memory (ROM)	Read-only memory	Not possible	Masks	Nonvolatile
Programmable ROM (PROM)			Electrically	
Erasable PROM (EPROM)	Read-mostly memory	UV light, chip level		
Electrically EPROM (EEPROM)		Electrically, byte level		
Flash memory		Electrically, block level		

ตารางที่ 4.1 ประเภทของหน่วยความจำแบบสารกึ่งตัวนำ

#### 4.6.1 หน่วยความจำรอม

เป็นหน่วยความจำแบบถาวรที่อ่านข้อมูลได้อย่างเดียว ไม่สามารถแก้ไขได้ ข้อมูลที่บันทึกไว้ในรอมจะยังคงอยู่แม้จะปิดเครื่อง จึงมักใช้เก็บไมโครโปรแกรม ชุดคำสั่งย่อยที่สำคัญ ตารางฟังก์ชัน โปรแกรมระบบ (BIOS) รวมถึงข้อมูลของอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนเมนบอร์ด เช่น ขนาดและประเภทของฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ ขนาดของแรม หน่วยประมวลผลที่ใช้ ซีดีไดรฟ์ที่ติดตั้ง เป็นต้น โดยทั่วไปข้อมูลที่บันทึกในรอมมักจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก หน่วยความจำรอมสามารถแบ่ง 4 ชนิด ดังต่อไปนี้

- **Masks ROM (ROM)** เป็นรอมโดยทั่วไปที่ถูกโปรแกรมมาแล้วจากโรงงาน โดยข้อมูลหรือโปรแกรมที่อยู่ในรอมชนิดนี้เป็นโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของคอมพิวเตอร์ หรืออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับรอมนั้นๆ ผู้ใช้ไม่สามารถนำรอมชนิดนี้มาโปรแกรมเองได้
- **Programmable ROM (PROM)** เป็นรอมที่ผู้ใช้สามารถโปรแกรมข้อมูลเข้าไปเองได้โดยใช้เครื่องโปรแกรม เรียกว่า PROM Burner สามารถโปรแกรมได้เพียงครั้งเดียว กล่าวคือ ถ้าโปรแกรมข้อมูลผิดพลาดเข้าไปก็ไม่สามารถลบแล้วโปรแกรมใหม่ได้ ปัจจุบันนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้
- **Erasable PROM (EPROM)** เป็นรอมที่ผู้ใช้สามารถโปรแกรมข้อมูลเข้าไปเองได้โดยใช้เครื่องโปรแกรม รอมชนิดนี้ดีกว่า PROM ตรงที่สามารถลบข้อมูลแล้วโปรแกรมใหม่ได้ โดยการลบข้อมูลจะใช้วิธีการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultra Violet – UV) และจะเป็นการลบข้อมูลทั้งหมด

- **Electrical Erasable PROM (EEPROM)** เป็นรอมที่ผู้ใช้สามารถโปรแกรมข้อมูลเข้าไปเองได้โดยใช้เครื่องโปรแกรม และสามารถลบข้อมูลแล้วโปรแกรมใหม่ได้เช่นเดียวกับ EPROM แต่ต่างกันว่า EEPROM ใช้การลบข้อมูลด้วยไฟฟ้า โดยการป้อนไฟฟ้าแรงดันสูงเข้าไปที่เซลล์หน่วยความจำที่ต้องการลบ ทำให้สามารถเลือกลบข้อมูลบางส่วนหรือข้อมูลทั้งหมดได้

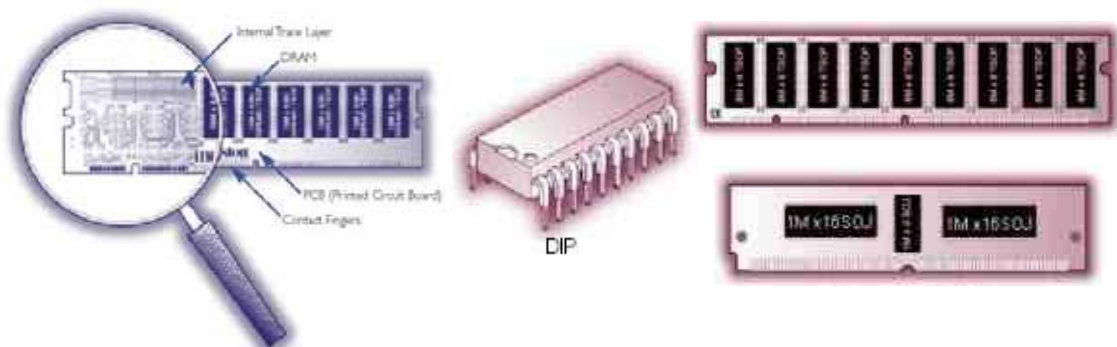
#### 4.6.2 หน่วยความจำแรม

เป็นหน่วยความจำชั่วคราวที่สามารถอ่านและเขียนได้ ข้อมูลจะสูญหายไปหมดเมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าเลี้ยง แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

- **Static RAM (SRAM)** เป็นหน่วยความจำที่สร้างขึ้นจากวงจรฟลิปฟล็อป (Flip-Flop) ข้อมูลจะถูกเก็บไว้จนกว่าจะไม่มีกระแสไฟฟ้ามาเลี้ยง ใช้เวลาในการเข้าถึงข้อมูลได้รวดเร็ว แต่มีราคาแพงและใช้พลังงานมากกว่า จึงมักนิยมนำไปใช้เป็นหน่วยความจำแคชซึ่งมีความจุไม่มากนัก
- **Dynamic RAM (DRAM)** เป็นหน่วยความจำที่ใช้หลักการทำงานของตัวเก็บประจุ (Capacitor) ซึ่งการมีประจุหรือไม่มีประจุก็คือการกำหนดค่าข้อมูลเป็น 0 หรือ 1 เมื่อตัวเก็บประจุมีประจุเต็มจะต้องคอยเติมประจุเป็นระยะๆ ตามวงรอบที่กำหนดเสมอ เรียกว่าการรีเฟรช (Refresh) เพื่อให้สถานะของการมีประจียังคงอยู่ หากปล่อยทิ้งไว้โดยไม่เติมประจุ ตัวเก็บประจุนั้นก็จะคายประจุออกจนหมดกลายเป็นไม่มีประจุ ทำให้ข้อมูลสูญหายไปได้ การรีเฟรชนี้ทำให้เสียเวลาเพิ่มขึ้นในการเข้าถึงข้อมูล และต้องทำอยู่ตลอดเวลาจึงเป็นที่มาของชื่อ Dynamic RAM หน่วยความจำชนิดนี้มีขนาดเล็กและราคาถูก จึงนิยมนำไปใช้เป็นหน่วยความจำหลักที่ต้องการความจุมากๆ

#### 4.6.3 โครงสร้างภายนอกของชิปหน่วยความจำ

หน่วยความจำมีหลายรูปแบบแตกต่างกันไปทั้งในแง่ขนาดและรูปร่าง โดยทั่วไปมักจะเป็นแผ่นแบนสี่เหลี่ยมซึ่งมีชิปสี่เหลี่ยมสีดำหลายๆ ชิปติดอยู่อยู่บนแผ่นนั้นที่เรียกว่าโมดูล (Memory module) หรืออาจเป็นชิปที่มีรูปร่างเป็นแพ็คเกจแบบที่เรียกว่า DIP (Dual In-line Package) ดังแสดงในรูป 4.7



รูปที่ 4.7 รูปร่างของหน่วยความจำแบบโมดูลชนิด SIMM และ DIMM และแบบ DIP

ในปัจจุบัน หน่วยความจำหลักที่ใช้ในเครื่องพีซีทั่วไปเป็นหน่วยความจำแบบ DRAM ทั้งหมด โดยทั่วไปมักเป็นแบบโมดูลชนิด SIMM (Single In-line Memory Module) หรือ DIMM (Dual In-line Memory Module) ที่เสียบอยู่บนสล็อตหน่วยความจำบนเมนบอร์ด ส่วนในคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก มักจะใช้หน่วยความจำที่มีขนาด

เล็กกว่า เรียกว่าแบบ SO DIMM (Small Outline DIMM) โมดูลหน่วยความจำแต่ละชนิดมีความกว้างของข้อมูลต่างกัน ทำให้สับสนุนคอมพิวเตอร์ที่มีบัสหน่วยความจำที่กว้างต่างกัน เช่น 8 บิต 16 บิต 32 บิต หรือ 64 บิต รวมถึงมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน เช่น จำนวนขา (Pin) ที่สัมผัสกับช่องที่เสียบบนเมนบอร์ด ความยาวของโมดูล จำนวนรอยบากบนโมดูล และวิธีการติดตั้ง

#### 4.6.4 เทคโนโลยีของหน่วยความจำ DRAM

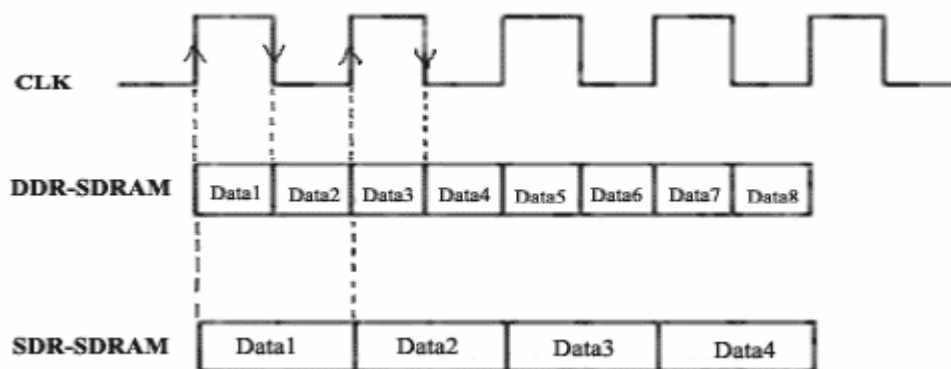
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าหน่วยความจำหลักที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ทั่วไปในปัจจุบัน เป็นหน่วยความจำแบบสารกึ่งตัวนำ และเป็นหน่วยความจำ DRAM ซึ่งมีหลายรูปแบบที่แตกต่างกัน ดังนั้น เราจึงควรจะเรียนรู้วิวัฒนาการของ DRAM เพื่อนำไปพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสม ตาราง 4.2 แสดงถึงการพัฒนาเทคโนโลยีของ DRAM แบบต่างๆ และความเร็วในการเข้าถึงข้อมูล

Year INTRODUCED	TECHNOLOGY	SPEED LIMIT
1987	FPM	50ns
1995	EDO	50ns
1997	PC66 SDRAM	66MHz
1998	PC100 SDRAM	100MHz
1999	RDRAM	800MHz
1999/2000	PC133 SDRAM	133MHz (VCM option)
2000	DDR SDRAM	266MHz
2001	DDR SDRAM	333MHz
2002	DDR SDRAM	434MHz
2003	DDR SDRAM	500MHz
2004	DDR2 SDRAM	533MHz
2005	DDR2 SDRAM	800MHz
2006	DDR2 SDRAM	667 - 800MHz
2007	DDR3 SDRAM	1066 - 1333MHz

ตารางที่ 4.2 การพัฒนาเทคโนโลยีของ DRAM

- Fast Page Mode DRAM (FPM DRAM) หรือมักเรียกสั้นๆ ว่า DRAM เป็นยุคเริ่มต้นของ DRAM ที่ได้รับการพัฒนาจากหน่วยความจำในยุคก่อน ทำให้สามารถเข้าถึงข้อมูลที่อยู่ใกล้เคียงกันได้เร็วขึ้น
- Extended-Data Output DRAM (EDO DRAM) เป็น DRAM ที่พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ.1995 คล้ายกับ FPM แตกต่างกันที่สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ต่อเนื่องกัน ทำให้ทำงานได้เร็วขึ้น โดยซีพียูสามารถเข้าถึงหน่วยความจำได้เร็วกว่า FPM 10-15%

- **Synchronous DRAM (SDRAM)** ถือเป็นการปฏิบัติเทคโนโลยี ซึ่งแตกต่างจาก DRAM แบบเดิม โดยออกแบบ SDRAM ให้ทำงานสอดคล้องกับจังหวะการทำงานของซีพียู ความเร็วในการเข้าถึงข้อมูลจะเปลี่ยนจากหน่วยนาโนวินาที (Nanosecond - ns) เป็นหน่วย MHz (ดูตาราง 4.2) การใช้สัญญาณนาฬิกาเป็นตัวกำหนดการทำงาน จะทำให้ตัวควบคุมหน่วยความจำรู้ได้ว่าวงรอบนาฬิกา (clock cycle) ใดที่ข้อมูลพร้อมสำหรับการอ่านหรือบันทึก ดังนั้นซีพียูจึงไม่จำเป็นต้องเสียเวลารอระหว่างที่เข้าถึงหน่วยความจำ ซีป SDRAM ยังถูกออกแบบให้เรียกใช้ได้เร็วขึ้นอีกด้วย โมดูล SDRAM แต่ละแบบจะมีความเร็วแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น PC66 SDRAM จะทำงานที่ความเร็ว 66 MHz, PC100 SDRAM จะทำงานที่ความเร็ว 100 MHz เป็นต้น ซึ่งความเร็วนี้ได้ถูกพัฒนาให้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้ SDRAM ทำงานได้เร็วขึ้น



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบการขนถ่ายข้อมูลของ (SDR) SDRAM กับ DDR SDRAM

- **Double Data Rate SRAM (DDR SDRAM)** เป็นหน่วยความจำในยุคถัดมาที่พัฒนาเพื่อมาแทนที่ SDRAM ทำให้ซีปหน่วยความจำสามารถทำงานขนถ่ายข้อมูลได้ 2 ครั้งภายใน 1 วงรอบสัญญาณนาฬิกา คือ ในช่วงขาขึ้นและขาลง ซึ่งแตกต่างจาก SDRAM ที่สามารถขนถ่ายข้อมูลได้เพียงครั้งเดียวคือเฉพาะช่วงขาขึ้นของวงรอบนาฬิกาเท่านั้น จึงเรียก SDRAM ว่าเป็น Single Data Rate หรือ SDR SDRAM ดังแสดงในรูป 4.8 ตัวอย่างเช่น DDR SDRAM ที่มีสัญญาณความเร็ว 100 MHz หรือ 133 MHz จะทำงานด้วยอัตราเร็ว (Effective data rate) 200 MHz และ 266 MHz เป็นต้น
- **Double Data Rate 2 SRAM (DDR2 SDRAM)** เป็นยุคที่สองของ DDR SDRAM ซึ่งมีการพัฒนาให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น (สูงสุดถึง 800 MHz) กินไฟน้อยลงและลดความร้อนที่เกิดขึ้น เหมาะสำหรับคอมพิวเตอร์แบบพกพา
- **Double Data Rate 3 SRAM (DDR3 SDRAM)** เป็นที่สามของ DDR SDRAM มีลักษณะคล้ายกับ DDR2 โดยพัฒนาให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น (สูงสุดถึง 1600MHz) แต่กินไฟน้อยลงและลดความร้อนที่เกิดขึ้นเช่นกัน เหมาะสำหรับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรเซสเซอร์แบบ dual หรือ quad core อีกทั้งยังเหมาะกับเครื่องคอมพิวเตอร์เซิร์ฟเวอร์และคอมพิวเตอร์แบบพกพาอีกด้วย

นอกจากนี้ยังมีเทคโนโลยีชิปที่ออกแบบและพัฒนามาเพื่อใช้ในงานด้านวีดีโอและการประมวลผลภาพอีกด้วย เช่น

- Video RAM (VRAM) ซึ่งใช้เทคโนโลยีแบบ FPM โดยทั่วไปแบ่งการทำงานเป็นสองช่องทาง โดยช่องทางหนึ่งใช้ในการรีเฟรชจอภาพ ในขณะที่อีกช่องทางหนึ่งใช้ในการเปลี่ยนแปลงภาพเพื่อแสดงผลบนจอภาพ ทำให้การประมวลผลงานด้านวีดีโอรวดเร็วขึ้น
- Window RAM (WRAM) เป็นหน่วยความจำที่มีสองช่องทางที่มักใช้กับระบบที่รองรับงานทางด้านกราฟิก แตกต่างจาก VRAM เล็กน้อยที่ช่องทางการแสดงผลจะมีขนาดเล็กกว่า
- Synchronous Graphics RAM (SGRAM) เป็นการนำเทคโนโลยีแบบ SDRAM มาใช้เพื่องานแสดงผลวีดีโอและภาพ สามารถเรียกใช้และแก้ไขข้อมูลได้เป็นบล็อกทำให้ลดเวลาในการอ่านและบันทึกข้อมูล ทำให้การประมวลผลภาพเร็วขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้ดีขึ้น

## 4.7 เอกสารอ้างอิงและเว็บไซต์ที่ควรรู้

Chapter 4-6 William Stalling. Computer organization and architecture: designing for performance.

บทที่ 3 ระบบคอมพิวเตอร์ สุจิตรา อดุลย์เกษม. เอกสารประกอบการสอนองค์ประกอบคอมพิวเตอร์และภาษา.

บทที่ 4 หน่วยความจำ อนิรุทธิ์ รัชตะวราห์และคณะ. ผาคอมพิวเตอร์ 2005. สำนักพิมพ์ provision

บทที่ 4 หน่วยความจำ นิพนธ์ บาดกลาง. เอกสารประกอบการสอนระบบคอมพิวเตอร์และสถาปัตยกรรม.

บทที่ 5 และ 7 Ron White. คอมพิวเตอร์ทำงานอย่างไร. สำนักพิมพ์ซีเอ็ด

[http://yalor.yru.ac.th/~nipon/Archi\\_html/4122701/e-learn.htm](http://yalor.yru.ac.th/~nipon/Archi_html/4122701/e-learn.htm)

<http://www.pcguide.com/ref/ram>

<http://www.kingston.com/tools/>

<http://www.quickpcextreme.com/blog/archives/354>