บทที่ 4
การสร้างเครื่องต้นแบบและการทดสอบการทำงาน

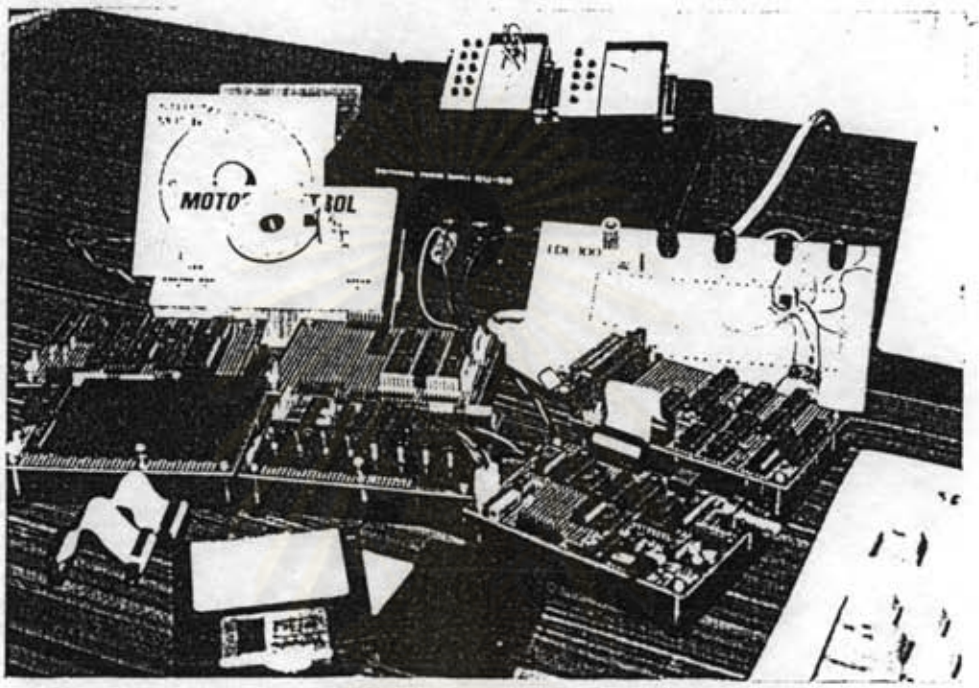
4.1 การสร้างเครื่องต้นแบบ

วงจรจะแยกออกเป็น 11 มอดูล โดยแต่ละมอดูล สามารถประกอบบนแผ่นวงจรพิมพ์ขนาดเล็กได้ และบางมอดูลลงประกอบในกล่องเอนกประสงค์ อุปกรณ์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์พื้นฐานในทางดิจิทัล หาซื้อได้ง่าย ไอซีที่นำมาใช้ส่วนใหญ่ เป็นไอซีตระกูล HCT (high speed CMOS) เนื่องจากใช้กำลังไฟฟ้าน้อย และปัจจุบันมีราคาที่ไม่แพง[21] สามารถใช้งานร่วมกับตระกูล TTL ได้โดยไม่ต้องแก้ไขเพิ่มเติมในวงจร ส่วนการต่อสายมอดูลเข้ากับบัสของระบบ จะใช้คอนเนกเตอร์แบบเคเบิลแบนขนาด 10x2 pin ซึ่งใช้งานในไมโครคอมพิวเตอร์ทั่วไป ความยาวของสายไม่ควรเกิน 2 ฟุต สำหรับการเชื่อมต่อมอดูลอื่น ๆ ใช้สายไฟฟ้าธรรมดา ถ้าเป็นสายที่มีจำนวนหลายเส้น ควรใช้คอนเนกเตอร์ แต่ถ้ามีจำนวนน้อย สามารถใช้สาย jumper ได้ ซึ่งสามารถต่อไปยังโปรโตบอร์ดเพื่อทำการทดลองต่าง ๆ ได้ ในส่วนของแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง ควรเลือกใช้คอนเนกเตอร์ชนิดที่ป้องกันการต่อสลับขั้ว ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายซึ่งอาจจะเกิดขึ้นกับวงจรอันเนื่องมาจากการจ่ายไฟผิด ในการวางอุปกรณ์บนแผ่นวงจรพิมพ์นั้น อุปกรณ์ที่ต้องมีการปรับแต่งควรวางให้อยู่ในตำแหน่งที่สะดวก เช่น trimpot, ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้, และสวิตช์กดต่าง ๆ ฯลฯ นอกจากนี้ ยังควรจัดให้เป็นหมวดหมู่ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเรียนรู้การทำงานของบอร์ดได้โดยง่าย เช่น จัดเป็นส่วนของวงจรถอดรหัสแอดเดรส ส่วนวงจรควบคุม ส่วนวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา เป็นต้น และควรให้ผู้ใช้สามารถมองเห็นส่วนประกอบของบอร์ดได้ เพื่อประโยชน์ในการเรียนรู้หลักการทำงานของวงจร

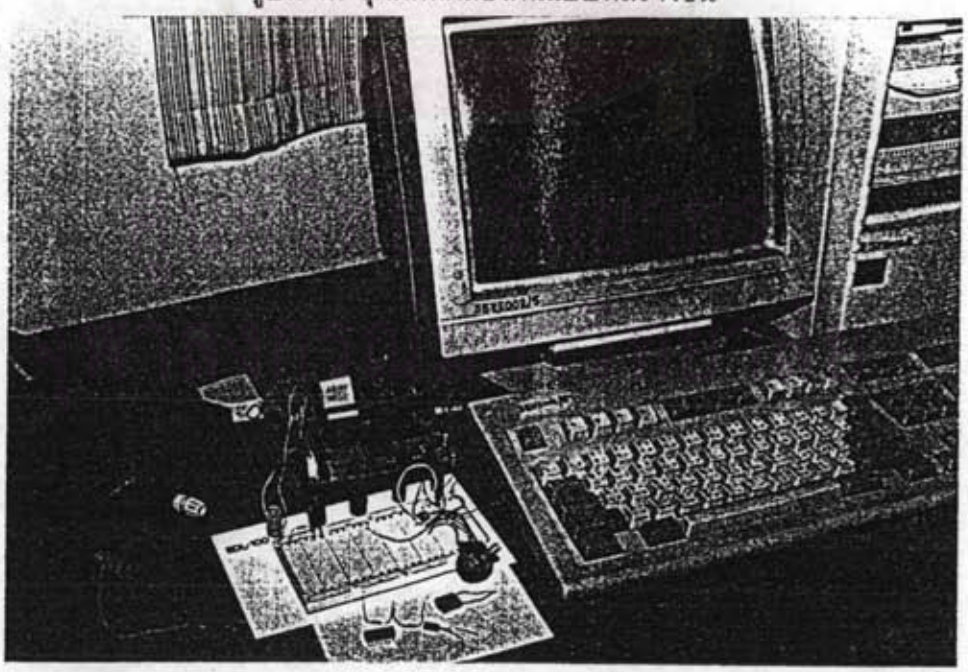
แหล่งจ่ายกำลังที่ใช้ในที่นี้ประกอบด้วยแหล่งแรงดันกระแสตรง 3 ค่า คือ +5V, +12V, -12V และเนื่องจากวงจรใช้กระแสไม่มาก จึงสามารถใช้แหล่งจ่ายขนาดเล็กได้ และถ้าใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง (switching power supply) ก็จะยิ่งทำให้มีขนาดเล็กลง สะดวกในการเคลื่อนย้าย อย่างไรก็ตาม เราสามารถใช้แหล่งจ่ายกำลังอื่น ๆ ที่ใช้ตามห้องทดลองทั่วไปได้

ไอซีทุกตัวในกลุ่มของดิจิทัล ควรต่อ C (ค่าประมาณ 0.1 μF) คร่อมขั้วบวกและลบของแรงดันเลี้ยงวงจร เพื่อลดสัญญาณรบกวนยอดแหลม(spike)ในวงจร ซึ่งอาจจะทำให้วงจรทำงานผิดพลาด ควรคำนึงถึงเรื่องสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้น เนื่องจากวงจรประกอบด้วยไอซีจำนวน

มากที่ทำงานแบบกระตุ้นด้วยขอบสัญญาณ(edge triggered) และมีความไวต่อสัญญาณรบกวน สายเชื่อมโยงของสัญญาณที่มีขนาดเล็ก ควรมีชีลด์(shield)หุ้ม เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนภายนอก เช่น สายสัญญาณเข้าแอนะลอก และสายสัญญาณเข้าของมอดูลขยายเสียง เป็นต้น ชุดฝึกทดลองต้นแบบที่สร้างขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.1-4.2



รูปที่ 4.1 ชุดฝึกทดลองต้นแบบที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4.2 ชุดฝึกทดลองขณะใช้งาน

4.2 ผลการวัดคุณสมบัติของเครื่อง

4.2.1 เมนบอร์ด

1) ความเร็วของเมนบอร์ด

ความเร็วของเมนบอร์ด วัดจากช่วงเวลาในการทำคำสั่ง IN และคำสั่ง OUT หรือดูจากแผนภาพการจัดจังหวะเวลาของระบบบัส ความเร็วของเมนบอร์ดจะขึ้นอยู่กับเครื่อง IBM PC ที่ใช้ โดยขึ้นอยู่กับความเร็วของ CPU และความเร็วบัส ปัจจัยสำคัญก็คือความเร็วบัส ทั้งนี้เนื่องจากในส่วนโปรแกรมควบคุมจะประกอบด้วยคำสั่ง Outport( ) ที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณควบคุมเป็นส่วนใหญ่ คำสั่งดังกล่าวเป็นคำสั่งที่ CPU ใช้เวลาส่วนใหญ่ในการติดต่อกับระบบบัส และปัจจุบันเครื่องคอมพิวเตอร์จำนวนมากมีความเร็วของ CPU ที่ไวกว่าระบบบัสมาก จึงทำให้ความเร็วบัสเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดความเร็ว อย่างไรก็ตามถ้าเป็นเครื่อง IBM PC รุ่นที่ใช้สัญญาณนาฬิกาต่ำกว่า 8 MHz เราจะพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อความเร็วก็คือ ความเร็วของ CPU และความเร็วของบัส ระบบบัสของ IBM PC ได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในระยะหลัง ๆ ทำให้สามารถสรุปชนิดของระบบบัสบนเครื่อง IBM PC ได้ดังตารางที่ 4.1[22]

ตารางที่ 4.1 ระบบบัสที่ใช้ในเครื่อง

ชื่อระบบบัส	รุ่นที่ใช้	ความเร็วสูงสุด
PC Bus	เครื่อง IBM PC รุ่นแรก	8 MHz
ISA Bus(AT Bus)	เครื่อง IBM PC/AT	8 MHz
EISA Bus	เครื่อง IBM PC ที่ใช้ CPU ตั้งแต่รุ่น 386 ขึ้นไป	ประมาณ 20 MHz
VESA Bus	เครื่อง IBM PC 386 ขึ้นไป	33 MHz
PCI Bus	เครื่อง IBM PC 386 ขึ้นไป	66 MHz

การทดสอบความเร็วของเมนบอร์ดจะใช้โปรแกรมทดสอบดังรูปที่ 4.3-4.4

```
#include<edl.h>
main()
{
        while(1)
        {
                in(0x00);
                in(0xff);
        }
}
```

รูปที่ 4.3 โปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบความเร็วในการอ่านข้อมูล

```
#include<edl.h>
main()
{
        while(1)
        {
                out(0x00,0xff);
                out(0xff,0x00);
        }
}
```

รูปที่ 4.4 โปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบความเร็วในการเขียนข้อมูล

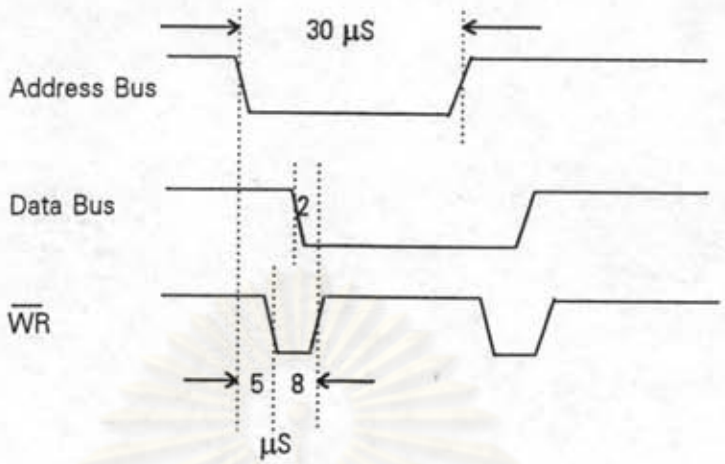
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการทดลองใช้งานเมนบอร์ดร่วมกับเครื่อง IBM-PC รุ่น 80386 DX-40 ที่ใช้บัส ISA สามารถวัดความเร็วได้ดังนี้

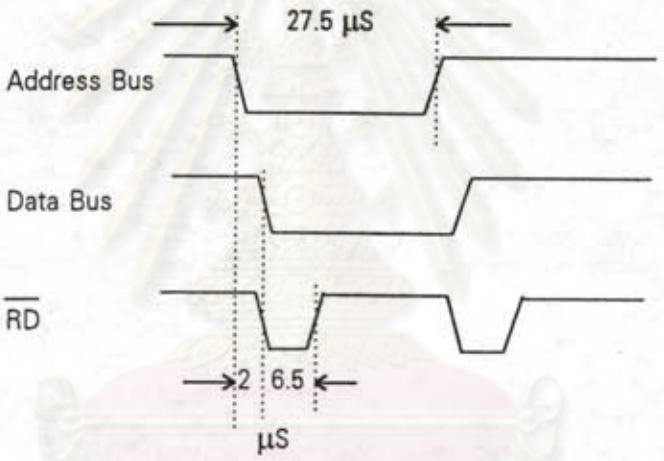
เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการคำสั่ง IN = 27.5 μS
เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการคำสั่ง OUT = 30 μS

โดยมีแผนภาพการจัดจังหวะเวลาของสัญญาณดังนี้

Write Cycle



Read Cycle



รูปที่ 4.5 แผนภาพการจัดจังหวะเวลาของระบบบัส

สำหรับเครื่องรุ่นอื่น ๆ ความเร็วในการ IN, OUT แสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบความเร็วในการ IN, OUT ของเครื่อง PC แต่ละรุ่น

รุ่น	บัสที่ใช้	เวลาในการ IN (µS)	เวลาในการ OUT(µS)	ความถี่ใช้งาน (kHz)
PC 8088	PC BUS	205	140	4.8
386-40 MHz	ISA BUS	27.5	30	33
486 DX2-66 MHz	ISA BUS	26	30	33
Pentium-S-90 MHz	PCI BUS	22	26	38

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่า ความเร็วของเมนบอร์ดถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 30 kHz สำหรับเครื่องรุ่น 386 ขึ้นมา ส่วนเครื่อง PC 8088 มีความเร็วต่ำกว่ามาก คือ ประมาณ 4.5 Kkz เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับความเร็วสูงสุดที่ต้องใช้ในการทำการทดลอง ซึ่งจะอยู่ที่การทดลองเรื่อง A/D ในเรื่องของการสุ่มสัญญาณเสียง ซึ่งจะต้องใช้ความถี่ต่ำสุดประมาณ 3.5 kHz (แบนด์วิดท์ของสายโทรศัพท์) จะเห็นว่ายังสามารถใช้งานได้ แม้เป็นเครื่อง PC 8088 อย่างไรก็ตาม เครื่องรุ่น PC 8088 ปัจจุบันก็ไม่เป็นที่นิยมใช้งานแล้ว อีกทั้งแนวโน้มในอนาคตก็กำลังจะหมดไป จึงไม่น่าจะเป็นปัญหาในการใช้งาน สำหรับเครื่องรุ่น 386 ขึ้นไป จะเห็นว่ามีความเร็วที่เพียงพอ เมื่อพิจารณาแล้วจะเห็นว่า แม้เครื่องที่มีความเร็วของ CPU ที่ต่างกันก็ยังมีความเร็วที่พอ ๆ กัน ทั้งนี้ดังที่กล่าวไปแล้วว่า เพราะในส่วนของโปรแกรมฟังก์ชัน IN, OUT ส่วนใหญ่ประกอบด้วยคำสั่ง การเขียน-อ่าน พอร์ด I/O ซึ่งเป็นคำสั่งที่ CPU ใช้ติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ความเร็วจึงขึ้นกับความเร็วของระบบบัส จะเห็นว่า เครื่อง 386-40 MHz กับเครื่อง 486DX-66 MHz มีความเร็วเท่ากัน เนื่องจากใช้ระบบบัสชนิดเดียวกัน ต่างกันที่คำสั่งการ IN ซึ่งถ้าไปพิจารณาในโปรแกรมของฟังก์ชัน IN จะพบว่า ในส่วนท้ายของฟังก์ชัน จะเป็นคำสั่งเกี่ยวกับการดำเนินการทางบิต ซึ่งเป็นคำสั่งที่ดำเนินการภายใน CPU ความเร็วของ CPU จะมีผลเด่นชัดขึ้นมา จะเห็นว่า ใช้เวลาในการ IN ต่างกัน 1.5 µs หรือถ้าพิจารณาเครื่อง PC 8088 จะพบคำสั่ง IN ใช้เวลานานกว่าคำสั่ง OUT ทั้ง ๆ ที่สำหรับเครื่องรุ่นอื่น ๆ จะใช้เวลาสั้นกว่า ทั้งนี้เพราะ CPU มีความเร็วในการทำงานช้า เมื่อต้องทำคำสั่งที่เกี่ยวข้องกับ CPU (คำสั่งการดำเนินการทางบิต) มาก ๆ ก็จะเห็นผลเด่นชัดขึ้นมา เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบบัสที่ต่างกัน จะเห็นว่ามีความเร็วต่างกัน โดย ที่บัสแบบ PCI มีความเร็วสูงสุด แต่ถ้าสังเกตดูต่อไป จะพบว่า ความเร็วต่างกันไม่มาก เมื่อเทียบกับความเร็วสูงสุดของชนิดของระบบบัส (ตาราง 4.1) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า แม้เป็นเครื่องที่มีระบบบัสเป็นแบบ PCI แต่อาจไม่ได้ใช้งานที่ความถี่สูงสุดของระบบบัส ทั้งนี้เพราะอุปกรณ์ติดตั้งยังไม่สามารถทำงานที่ความถี่ดังกล่าวได้ ในส่วนการพิจารณาความเร็วของระบบบัสนี้เป็นส่วนที่จะต้องทำการวิจัยต่อไปในภายหน้า

เมื่อทดสอบความเร็ว โดยทดลองใช้กับพอร์ตขนานชนิดที่ถูกพัฒนาขึ้นในระยะหลัง ๆ เช่น พอร์ตขนานแบบ ECP , EPP , SPP ก็พบว่ามีความเร็วที่ไม่แตกต่างกัน โดยได้ทดลองกับเครื่อง Pentium-S 75 MHz วัดความถี่สูงสุดในการใช้งาน ได้ 35.7 kHz ฉะนั้นพอร์ตชนิดใหม่ ๆ อาจไม่มีผลต่อความเร็วของเมนบอร์ด ในส่วนการพิจารณาชนิดของระบบบัส และชนิดของพอร์ตขนาน เป็นส่วนที่จะต้องทำการวิจัยต่อไปในภายหน้า

จากแผนภาพการจัดจังหวะเวลาของระบบบัส (รูปที่ 4.3) เมื่อพิจารณาในแง่การนำไปใช้งาน (โดยใช้เครื่อง 386-40 MHz) จะเป็นดังนี้ ในช่วงไซเคิลของการเขียนข้อมูล(write cycle) หลังจากเมนบอร์ดได้ส่งสัญญาณแอดเดรสมาที่บัสแอดเดรส และส่งสัญญาณ $\overline{WR}$ เป็น Low มาแล้ว เมนบอร์ดจะส่งข้อมูลมาที่บัสข้อมูลหลังจาก $\overline{WR}$ เปลี่ยนสถานะไปเป็น Low แล้วประมาณ 6 µS และจะคงอยู่จน $\overline{WR}$ กลับเป็น High ไปประมาณ 8 µS ฉะนั้นอุปกรณ์ภายนอกจะต้องอ่านข้อมูลจากบัสข้อมูลในช่วงเวลาดังกล่าว ซึ่งเราอาจใช้สัญญาณขอบขาขึ้นของ $\overline{WR}$ เป็นสัญญาณที่ให้อุปกรณ์ภายนอกมาอ่านข้อมูลไป จะเห็นว่า บัสแอดเดรสจะยังคงมีสถานะเดิมจนกว่าจะมีการเลือกแอดเดรสใหม่ ในช่วงไซเคิลของการอ่านข้อมูล หลังจากเมนบอร์ดได้ส่งสัญญาณแอดเดรสมายังบัสแอดเดรสประมาณ 2 µS สัญญาณ $\overline{RD}$ จะเปลี่ยนสถานะเป็น Low เพื่อบอกให้อุปกรณ์ภายนอกส่งข้อมูลมาที่บัสข้อมูล หลังจากนั้น CPU จะมาอ่านข้อมูลไปจากบัสข้อมูล โดยจะอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 3 µS นั่นคือ อุปกรณ์ภายนอกหลังจากได้รับสัญญาณ $\overline{RD}$ แล้วจะมีช่วงเวลาประมาณ 3 µS (=3000 ns) ในการส่งข้อมูลมาที่บัสข้อมูล ซึ่งอุปกรณ์ส่วนใหญ่สามารถทำงานได้ทันเวลาดังกล่าว ตัวอย่างเช่น 8253-5 มีช่วงเวลาเข้าถึง(access time) เท่ากับ 200 nS [13]

2) **ระดับสัญญาณทางตรรกและแฟนเอาต์ของบัส**

เมนบอร์ดสร้างจากไอซีตระกูล HCT ซึ่งมีคุณสมบัติดังในตารางที่ 4.3 [23]

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของไอซีตระกูล HCT

Supply Voltage	5±10%	Volts
DC Fanout	10	LSTTL Inputs
Minimum 'High' Input	2	Volts
Maximum 'Low' Input	0.8	Volts
Minimum 'High' Output	Vcc-0.1	Volts
Maximum 'Low' Output	0.1	Volts
Input Current (low)	1	µA
Input Current (high)	-1	µA
Output Current (high)	-4	mA
Output Current (low)	+4	mA

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของไอซีตระกูล HCT(ต่อ)

Temperature Range	-40 to +85	°C
Typical Max. Clock Frequency	40	MHz

จากการทดลองวัดแรงดันของบัส ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ระดับแรงดันของบัส

	เอาต์พุต High (V)	เอาต์พุต Low (V)
ไม่ใช้ไฟเลี้ยงจากภายนอก	4.15	0.00
ใช้ไฟเลี้ยงจากภายนอก	4.33	0.00

เมื่อพิจารณาแฟนเอาต์ของบัสจากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่า สามารถต่ออินพุตได้ 5 อินพุต LSTTL และถ้าเป็นอินพุต ชนิด HCT จะรับได้ถึง 50 อินพุต[23] ในการออกแบบ เนื่องจากได้ออกแบบให้สามารถขยายระบบต่อไปได้ ฉะนั้นวงจรของมอดูลในส่วนที่ต่อเข้ากับบัสจึงพยายามเลือกใช้ไอซีชนิด HCT ตัวอย่างเช่น ในส่วนของวงจรถอดรหัสแอดเดรส เพื่อจะสามารถรับอินพุตที่จะต่อเพิ่มเติมได้

3) การใช้กระแส

เมนบอร์ดใช้กระแสน้อยมาก คือ ประมาณ 1.5 mA และเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อใช้งานที่ความถี่สูงขึ้น และเมื่อต่อมอดูลอื่น ๆ เพิ่มเข้าไป ก็ปรากฏว่า ยังใช้กระแสเท่าเดิม จะเห็นว่าสามารถใช้บิตที่ไม่ใช้งานของพอร์ตขนานทำหน้าที่ในการจ่ายไฟเลี้ยงให้แก่วงจรได้ เนื่องจากแต่ละบิตสามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 15 mA ซึ่งเพียงพอแก่ความต้องการ

4.2.2 มอดูล

มอดูลต่าง ๆ สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง สำหรับมอดูลสวิตช์ แม้ไม่ได้จ่ายไฟให้แก่มอดูล ในส่วนของ LED และสวิตช์ก็ยังสามารถทำงานได้ (ต่อมอดูลเดียวเข้ากับเมนบอร์ด) แต่ความสว่างของ LED จะน้อยกว่าเท่าที่ควร แต่ยังสามารถสังเกตเห็นได้ สำหรับมอดูลแสดงผล

ความสว่างของ LED ยังน้อยเกินไป และ LED แต่ละดวงสว่างไม่เท่ากัน จึงควรเปลี่ยนไปใช้ LED แบบความจ้าสูง(super bright) แทนซึ่งให้ความสว่างมากกว่าแต่ใช้กระแสเท่ากัน

เมื่อลองวัดการใช้กระแสของชุดฝึกทดลอง โดยต่อมอดูลทุกมอดูลเข้ากับเมนบอร์ดและให้ทุกมอดูลทำงานอย่างเต็มที่ ได้ผลดังนี้

Supply Voltage	Max. Current
+5V	200 mA
+12V	1.5 A
-12V	15 mA

ซึ่งข้อมูลข้างต้นนี้ จะนำไปพิจารณาเลือกใช้แหล่งจ่ายกำลังของชุดฝึกทดลอง

4.3 การทำการทดลอง

เนื้อหาบางส่วนของใบงานการทดลอง ได้ทดลองนำไปให้นิสิตในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ใช้ทำการทดลองในวิชา Microprocessor-Based System Design Laboratory ซึ่งใช้เวลาครึ่งภาคการศึกษา โดยมีการปฏิบัติรวม 5 การทดลอง คือ การเขียนโปรแกรมภาษา C, การรับ/ส่งข้อมูลดิจิทัล, ตัวแปลงผัน D/A, ตัวแปลงผัน A/D และ ตัวจับเวลา/ตัวนับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย