ภาคผนวก I

การทดลองที่ 9 การพัฒนาโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีขั้นสูง

การพัฒนาโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีขั้นสูง จะเน้นการพัฒนาร่วมกับภาษา C เพื่อเพิ่มศักยภาพของโปรแกรมภาษา C ให้ทำงานได้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยเฉพาะฟังก์ชันที่สำคัญและต้องเชื่อมต่อกับฮาร์ดแวร์อย่างลึกซึ้ง และถ้ามีประสบการณ์การดีบักโปรแกรมภาษา C จากการทดลองที่ 6 จะยิ่งทำให้ผู้อ่านเข้าใจการทดลองนี้ได้เพิ่มขึ้น ดังนั้น การทดลองมีวัตถุประสงค์เหล่านี้

- เพื่อฝึกการดีบักโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีโดยใช้โปรแกรม GDB แบบคอมมานด์ไลน์ (Command Line)
- เพื่อพัฒนาพัฒนาโปรแกรมแอสเซมบลีโดยใช้ Stack Pointer (SP) หรือ R13
- เพื่อพัฒนาโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีร่วมกับภาษา C
- เพื่อเสริมความเข้าใจเรื่องเวอร์ชวลเมโมรีในหัวข้อที่ 6.2

I.1 ดีบักเกอร์ GDB

ดีบักเกอร์เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่รันโปรแกรมที่กำลังพัฒนา เพื่อให้โปรแกรมเมอร์ตรวจสอบการทำงานได้ลึกซึ้งยิ่งขึ้น ทำให้โปรแกรมเมอร์สามารถเข้าใจการทำงานของโปรแกรมอย่างถ่องแท้ และหากโปรแกรมมีปัญหาหรือ ดีบัก ที่บรรทัดไหน ตำแหน่งใด ดีบักเกอร์เป็นเครื่องมือที่จะช่วยแก้ปัญหานั้นได้ในที่สุด

GDB เป็นดีบักเกอร์มาตรฐานทำงานในระบบปฏิบัติการยูนิกซ์ สามารถช่วยโปรแกรมเมอร์แก้ปัญหาของโปรแกรมที่พัฒนาจากภาษา C/C++ รวมถึงภาษาแอสเซมบลีของซีพียูนั้น ๆ เช่น แอสเซมบลีของซีพียู ARM บนบอร์ด Pi นี้

ผู้อ่านสามารถย้อนกลับไปศึกษาการทดลองที่ 6 หัวข้อ F.2 และการทดลองที่ 7 หัวข้อ G.2 อีกรอบเพื่อสังเกตรายละเอียดการสร้างโปรเจกต์ได้ว่า เราได้เลือกใช้ GDB เป็นดีบักเกอร์ ผู้อ่านสามารถเรียนรู้การดีบักโปรแกรมแอสเซมบลี พร้อม ๆ กับทำความเข้าใจคำสั่งใน GDB ไปพร้อม ๆ กัน ดังนี้

1. เปิดแอป Terminal
2. ย้ายไดเรกทอรีไปยัง /home/pi/asm โดยใช้คำสั่ง $ cd /home/pi/asm
3. สร้างไดเรกทอรี lab9 โดยใช้คำสั่ง $ mkdir lab9
4. ย้ายไดเรกทอรีเข้าไปใน lab9 โดยใช้คำสั่ง $ cd lab9
5. ตรวจสอบว่าไดเรกทอรีปัจจุบันโดยใช้คำสั่ง pwd
6. สร้างไฟล์ชื่อ Lab9_1.s ด้วยเท็กซ์อีดีเตอร์ nano เพื่อกรอกคำสั่งภาษาแอสเซมบลี ต่อไปนี้

```
        .global main
main:
        MOV   R0, #0
        MOV   R1, #1
        B     _continue_loop
 _loop:
        ADD   R0, R0, R1
 _continue_loop:
        CMP   R0, #9
        BLE   _loop
end:
      BX LR
```

7. สร้าง makefile แล้วกรอกประโยคคำสั่งต่อไปนี้

```
debug: Lab9_1.s
        as -g -o Lab9_1.o Lab9_1.s
        gcc -o Lab9_1 Lab9_1.o
        gdb Lab9_1
```

บันทึกไฟล์และออกจากโปรแกรม nano อีดิเตอร์

8. รันคำสั่งต่อไปนี้ เพื่อทดสอบว่า makefile ถูกต้องหรือไม่ หากถูกต้องโปรแกรม Lab9_1 จะรันใต้ GDB เพื่อให้ผู้อ่านดีบักโปรแกรม

```
$ make debug
```

9. พิมพ์คำสั่ง list หลังสัญลักษณ์ (gdb) เพื่อแสดงคำสั่งภาษาแอสเซมบลีที่จะ execute ทั้งหมด

```
(gdb) list
```

ค้นหาตำแหน่งของคำสั่ง CMP R0, #9 ว่าอยู่ ณ บรรทัดที่เท่าไหร่ สมมติให้เป็นตัวแปร x เพื่อใช้ประกอบการทดลองต่อไป

10. ตั้งค่าเบรกพอยน์เพื่อหยุดการรันโปรแกรมชั่วคราว และเปิดโอกาสให้โปรแกรมเมอร์สามารถตรวจสอบค่าของรีจิสเตอร์ต่าง ๆ ได้ โดยใช้คำสั่ง

```
(gdb) b x
```

โดย x คือ หมายเลขบรรทัดที่คำสั่ง CMP R0, #9 ตั้งอยู่

11. รันโปรแกรม โดยพิมพ์คำสั่งต่อไปนี้ บันทึกและอธิบายผลลัพธ์

```
  (gdb) run
```

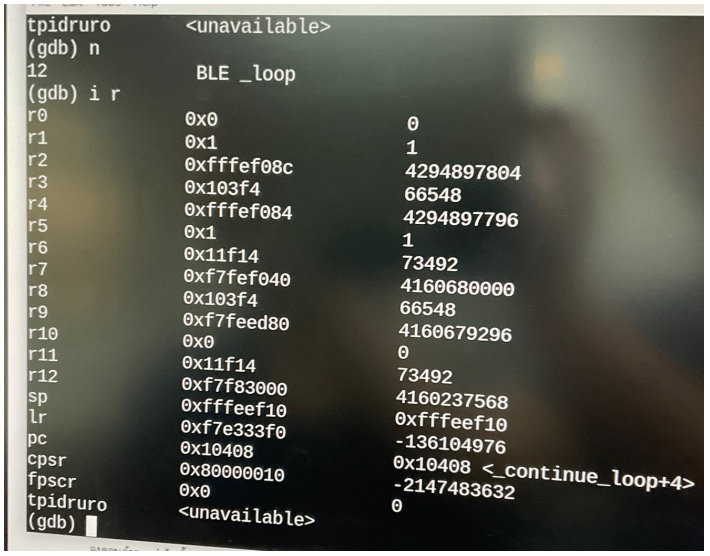
จะได้ผลตอบรับจาก GDB ดังนี้

```
Breakpoint 1, _continue_loop () at Lab9_1.s: x
```

โปรดสังเกตค่า x เป็นหมายเลขบรรทัดที่ตรงกับคำสั่งใด 11

12. โปรดสังเกตว่าสัญลักษณ์ (gdb) ปรากฏขึ้นแสดงว่าโปรแกรมหยุดที่เบรกพอยน์แล้ว พิมพ์คำสั่ง (gdb) i r เพื่อแสดงค่าภายในรีจิสเตอร์ต่าง ๆ ทั้งหมด และบันทึกค่าฐานสิบหกของรีจิสเตอร์เหล่านี้ r0, r1, r9, sp, pc, cpsr พิมพ์ n แล้วกด Enter เพื่อรันคำสั่งถัดไปแล้วเปรียบเทียบกับรายการต่อไปนี้

```
(gdb) i r
r0             0x0         0
r1             0x1         1
r2             0x7effefec  2130702316
r3             0x10408     66568
r4             0x10428     66600
r5             0x0         0
r6             0x102e0     66272
r7             0x0         0
r8             0x0         0
r9             0x0         0
r10            0x76fff000  1996484608
r11            0x0         0
r12            0x7effef10  2130702096
sp             0x7effee90  0x7effee90
lr             0x76e7a678  1994892920
pc             0x1041c     0x1041c <_continue_loop+4>
cpsr           0x80000010  -2147483632
```



จงตอบคำถามต่อไปนี้ประกอบความเข้าใจ

- อธิบายรายงานบนหน้าจอว่าคอลัมน์แต่ละคอลัมน์มีความหมายอย่างไร และแตกต่างกับหน้าจอของผู้อ่านอย่างไร

คอลัมน์แรกคือรีจิสเตอร์ที่ใช้ใน CPU, คอลัมน์ที่สองคือค่าที่แสดงในรีจิสเตอร์ในรูปแบบเลขฐาน 16, คอลัมน์สุดท้ายคือค่าในฐาน 10, ซึ่งต่างจากของผู้เรียนตรงที่ค่าไม่เหมือนกัน

- เหตุใดรีจิสเตอร์ cpsr มีค่าเป็นเลขฐานสิบในคอลัมน์ขวาสุดมีค่าติดลบ หมายเหตุ ศึกษาเรื่องเลขจำนวนเต็มฐานสองชนิดมีเครื่องหมาย แบบ 2's Complement ในหัวข้อที่ 4.2.2

รีจิสเตอร์ CPSR ใช้เก็บบิตสำหรับการดำเนินการทางคณิตศาสตร์และตรรกศาสตร์ หากค่าที่เก็บไว้ถูกตีความว่าเป็น signed int. ระบบจะแปลความโดยใช้ 2's Complement ดังนั้นถ้าคอลัมน์ขวาสุดแสดงค่าติดลบ นั่นเป็นเพราะ MSB มีค่าเป็น 1

13. พิมพ์คำสั่ง (gdb) c เพื่อรันโปรแกรมต่อไปจนกว่าจะวนรอบกลับมาที่เบรกพอยน์ที่ตั้งไว้

14. พิมพ์คำสั่ง (gdb) info r เพื่อแสดงค่าภายในรีจิสเตอร์ต่าง ๆ ทั้งหมด และบันทึกค่าของรีจิสเตอร์เหล่านี้ r0, r1, sp, pc, cpsr เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงกับรอบที่แล้ว

15. เริ่มต้นการทดลองโดยพิมพ์คำสั่งต่อไปนี้เพื่อหาว่า เลเบล _loop ตรงกับหน่วยความจำตำแหน่งใด

```
(gdb) disassemble _loop
```

ผล (ตำแหน่ง memory เริ่มต้นของ main − ตำแหน่ง memory เริ่มต้นของ text)

บันทึกผลที่ได้โดย หมายเลขซ้ายสุด คือ แอดเดรสในหน่วยความจำ ที่คำสั่งนั้นบรรจุอยู่ หมายเลขตำแหน่งถัดมา คือ จำนวนไบต์นับจากจุดเริ่มต้นของชื่อเลเบลนั้น แล้วตรวจสอบว่าเลเบล main อยู่ห่างจากตำแหน่งเริ่มต้นของโปรแกรมกี่ไบต์

```
Dump of assembler code for function _loop:
   0x00010414 <+0>: add r0, r0, r1
End of assembler dump.
```

16. พิมพ์คำสั่ง (gdb) c เพื่อรันโปรแกรมต่อไปจนกว่าจะวนรอบกลับมาที่เบรกพอยน์ที่ตั้งไว้อีกรอบ

17. คำสั่ง x/ [count] [format] [address] แสดงค่าใน หน่วยความจำ ณ ตำแหน่ง address เป็นต้นไป เป็น จำนวน /count ตาม format ที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น x/10i main คือ แสดงค่าในหน่วยความจำ ณ ตำแหน่งเลเบล main จำนวน 10 ค่าตามรูปแบบ instruction ดังตัวอย่างต่อไปนี้

```
(gdb) x/10i main
   0x10408 <main>: mov r0, #0
   0x1040c <main+4>: mov r1, #1
   0x10410 <main+8>: b 0x10418 <_continue_loop>
   0x10414 <_loop>: add r0, r0, r1
```

```
   0x10418 <_continue_loop>: cmp r0, #9
=> 0x1041c <_continue_loop+4>: ble 0x10414 <_loop>
   0x10420 <end>: mov r7, #1
   0x10424 <end+4>: svc 0x00000000
   0x10428 <__libc_csu_init>: push {r4, r5, r6, r7, r8, r9, r10, lr}
   0x1042c <__libc_csu_init+4>: mov r7, r0
```

จงตอบคำถามต่อไปนี้

- เติมตัวอักษรที่เว้นว่างไว้จากหน้าจอของผู้อ่านในเครื่องหมาย <_ > สองตำแหน่ง loop
- อธิบายว่า ตัวอักษรหรือตัวเลขใน <_ > คืออะไร คือ label ที่เขียนไว้ในโปรแกรมเพื่อเพิ่ม R0 เข้าไปทุกครั้ง
- โปรดสังเกตและอธิบายว่าเครื่องหมายลูกศร => ด้านซ้ายสุดหน้าบรรทัดคำสั่ง หมายถึงอะไร แสดงว่าโปรแกรมกำลังถูกประมวลผลในบรรทัดนั้นอยู่

18. คำสั่ง (gdb) s i ระหว่างที่เบรกการรันโปรแกรม ผู้ใช้สามารถสั่งให้โปรแกรมทำงานต่อเป็นจำนวน i คำสั่งเพื่อตรวจสอบ

19. คำสั่ง (gdb) n i ทำงานคล้ายคำสั่ง s i แต่ถ้าคำสั่งต่อไปที่จะทำงานเป็นการเรียกฟังก์ชัน คำสั่งนี้เรียกใช้ฟังก์ชันนั้นจนสำเร็จ แล้วจึงเบรกให้ผู้ใช้ตรวจสอบ

20. พิมพ์คำสั่ง (gdb) i b เพื่อแสดงรายการเบรกพอยน์ทั้งหมดที่ตั้งไว้ก่อนหน้า ดังนี้

```
(gdb)i b
Num     Type           Disp Enb Address    What
1       breakpoint     keep y   0x0001041c Lab9_1.s:11
breakpoint already hit 3 times
```

ผู้อ่านจะต้องทำความเข้าใจรายงานที่ได้บนหน้าจอ โดยเฉพาะคอลัมน์ Address และ What โดยเติมตัวอักษรลงในช่องว่าง _ ทั้งสองช่อง

21. คำสั่ง (gdb) d b number ลบการตั้งเบรกพอยน์ที่บรรทัด number ที่ตั้งไว้ก่อนหน้า ผู้อ่านสามารถลบเบรกพอยน์ทั้งหมดพร้อมกันโดยพิมพ์

```
(gdb)d
Delete all breakpoints? (y or n)
```

แล้วตอบ y เพื่อยืนยัน

22. พิมพ์คำสั่ง (gdb) c เพื่อรันโปรแกรมต่อไปจนเสร็จสิ้นจะได้ผลลัพธ์ต่อไปนี้

```
(gdb) c
Continuing.
[Inferior 1 (process 1688) exited with code 012]
```

23. พิมพ์คำสั่งต่อไปนี้เพื่อออกจากโปรแกรม GDB

```
(gdb) q
```

I.2 การใช้งานสแต็กพอยน์เตอร์ (Stack Pointer)

ตำแหน่งของหน่วยความจำบริเวณที่เรียกว่า สแต็กเซ็กเมนต์ (Stack Segment) จากรูปที่ 2.13 สแต็กเซ็กเมนต์ตั้งในบริเวณแอดเดรสสูง (High Address) หน้าที่เก็บค่าข้อมูลของตัวแปรชนิดโลคอล (Local Variable) รับค่าพารามิเตอร์ระหว่างฟังก์ชัน กรณีที่มีจำนวนเกิน 4 ตัว พักเก็บค่าของรีจิสเตอร์ที่สำคัญ ๆ เช่น LR เป็นต้น

สแต็กพอยน์เตอร์ คือ รีจิสเตอร์ R13 มีหน้าที่เก็บแอดเดรสตำแหน่งบนสุดของสแต็ก (Top of Stack: TOS) ซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่เกิดการ PUSH และ POP ข้อมูลเข้าและออกจากสแต็กตามลำดับ โปรแกรมเมอร์สามารถจินตนาการได้ว่า สแต็ก คือ กองสิ่งของที่วางซ้อนกันโดยโปรแกรมเมอร์ และสามารถหยิบสิ่งของออก (POP) หรือวาง (PUSH) ของที่ชั้นบนสุดเท่านั้น โดยเราเรียกกองสิ่งของ (ตัวแปรโลคอลและอื่นๆ) นี้ว่า สแต็กเฟรม ซึ่งได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.3.3 เราสามารถทำความเข้าใจการทำงานของสแต็กแบบง่าย ๆ ได้ดังนี้

สแต็กพอยน์เตอร์ คือ หมายเลขชั้นสิ่งของ ซึ่งตำแหน่งจะลดลง/เพิ่มขึ้น เมื่อโปรแกรมเมอร์ใช้คำสั่ง PUSH/POP ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 5.5 ทั้งนี้เราสามารถอ้างอิงจากเวอร์ชวลเมโมรีของระบบลินุกซ์ ในรูปที่ 2.13 และรูปที่ 6.2 ประกอบ

คำสั่ง STM (Store Multiple) ทำหน้าที่ PUSH ข้อมูลหรือค่าของรีจิสเตอร์จำนวนหนึ่งลงบนสแต็ก ณ ตำแหน่ง TOS คำสั่ง LDM (Load Multiple) ทำหน้าที่ POP ข้อมูลออกจากสแต็ก ณ ตำแหน่ง TOS มาเก็บในรีจิสเตอร์จำนวนหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของ TOS เป็นไปได้สองทิศทาง คือ เพิ่มขึ้น (Ascending)/ลดลง (Descending). ดังนั้น คำสั่ง STM/LDM สามารถผสมกับทิศทางและลำดับการกระทำ คือ ก่อน (Before) /หลัง (After) รวมเป็น 8 แบบ ดังนี้

- LDMIA/STMIA : IA ย่อจาก Increment After
- LDMIB/STMIB : IB ย่อจาก Increment Before
- LDMDA/STMDA : DA ย่อจาก Decrement After
- LDMDB/STMDB : DB ย่อจาก Decrement Before

คำ Increment/Decrement หมายถึง การเพิ่ม/ลดค่าของรีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องโดยมักใช้งานร่วมกับรีจิสเตอร์ SP คำ after/before หมายถึง ก่อน/หลังการปฏิบัติ (Execute) ตามคำสั่งนั้น ยกตัวอย่าง การใช้งานคำสั่งเพื่อ PUSH รีจิสเตอร์ลงในสแต็กโดยใช้ STMDB และ POP ค่าจากสแต็กจะคู่กับคำสั่ง LDMIA ความหมาย คือ สแต็กจะเติบโตในทิศทางที่แอดเดรสลดลง (Decrement Before) ซึ่งเป็นที่นิยมและตรงกับรูปการจัดวางเวอร์ชวลเมโมรีหรือหน่วยความจำเสมือนในรูปที่ 2.13 ผู้อ่านสามารถทบทวนเรื่องนี้ในหัวข้อที่ 6.2

1. สร้างไฟล์ Lab9_2.s ตามโค้ดต่อไปนี้ ผู้อ่านสามารถข้ามประโยคคอมเมนต์ได้ เมื่อทำความเข้าใจแต่ละคำสั่งแล้ว

```
        .global main
main:
        MOV R1, #1
        MOV R2, #2

        @ Push (store) R1 onto stack at SP-4, then SP = SP-4 bytes
        @ The ! (Write-Back symbol) updates the register SP
        STR R1, [sp, #-4]!
        STR R2, [sp, #-4]!
```

```
    @ Pop (load) the value at SP and add 4 to SP
    LDR R0, [sp], #+4
    LDR R0, [sp], #+4
end:
    BX LR
```

2. รันโปรแกรม บันทึกและอธิบายผลลัพธ์

3. สร้างไฟล์ Lab9_3.s ตามโค้ดต่อไปนี้ ผู้อ่านสามารถข้ามประโยคคอมเมนต์ได้ เมื่อทำความเข้าใจแต่ละคำสั่งแล้ว

```
    .global main
main:
    MOV R1, #0
    MOV R2, #1
    MOV R4, #2
    MOV R5, #3

    @ SP is decremented by 8 bytes before pushing R4 and R5
    @ The ! (Write-Back symbol) updates SP accordingly.
    STMDB  SP!, {R4, R5}

    @ R2 and R1 are popped, respectively.
    @ SP is incremented after (IA) that
    LDMIA  SP!, {R1, R2}
    ADD    R0, R1, #0
    ADD    R0, R0, R2

end:
    BX LR
```

4. รันโปรแกรม บันทึกและอธิบายผลลัพธ์

```
$ make Lab9_3
$ ./Lab9_3
$ echo $?
```

5. ค้นคว้าการประยุกต์ใช้งานคำสั่ง STM/LDM สำหรับการทำงานของระบบปฏิบัติการ

1. STM และ LDM ช่วยให้สามารถบันทึกหรือเรียกคืนค่าของรีจิสเตอร์หลายตัวไปยัง stack ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. เมื่อระบบต้องการสลับการทำงานระหว่างโปรเซส STM/LDM ช่วยให้การบันทึกและเรียกคืนค่าทำได้อย่างรวดเร็ว
3. ใช้ LDM เพื่อคัดลอกหรือย้ายข้อมูลขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็วเพื่อโหลดข้อมูลเข้ารีจิสเตอร์ และใช้ STM เพื่อส่งข้อมูลจากรีจิสเตอร์ไปยังปลายทาง

I.3 การพัฒนาโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีร่วมกับภาษา C

การพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา C สามารถเชื่อมต่อกับฮาร์ดแวร์ และทำงานได้รวดเร็วใกล้เคียงกับภาษาแอสเซมบลี แต่การเสริมการทำงานของโปรแกรมภาษา C ด้วยภาษาแอสเซมบลียังมีความจำเป็นโดยเฉพาะโปรแกรมที่เรียกว่า ดีไวซ์ไดรเวอร์ (Device Driver) ซึ่งเป็นโปรแกรมขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกับฮาร์ดแวร์ที่ต้องการความรวดเร็วและประสิทธิภาพสูง การทดลองนี้จะแสดงให้ผู้อ่านเห็นการเชื่อมต่อฟังก์ชันภาษาแอสเซมบลีกับภาษา C อย่างง่าย

1. เปิดโปรแกรม CodeBlocks
2. สร้างโปรเจกต์ Lab9_4 ภายใต้ไดเรกทอรี /home/pi/asm/lab9
3. สร้างไฟล์ชื่อ add_s.s และป้อนคำสั่งต่อไปนี้

```
     .global add_s
add_s:
ADD R0, R0, R1
BX LR
```

4. เพิ่มไฟล์ add_s.s ในโปรเจกต์ Lab9_4 ที่สร้างไว้ก่อนหน้า
5. สร้างไฟล์ชื่อ main.c และป้อนคำสั่งต่อไปนี้

```
#include <stdio.h>
int main(){
    int a = 16;
    int b = 4;
```

```
    int i = add_s(a, b);
    printf("%d + %d = %d \n", a, b, i);
    return 0;
}
```

6. ทำการ Build และแก้ไขหากมีข้อผิดพลาดจนสำเร็จ

7. Run และสังเกตการเปลี่ยนแปลง

8. อธิบายว่าเหตุใดการทำงานจึงถูกต้อง ฟังก์ชัน add_s รับข้อมูลทางรีจิสเตอร์ตัวไหนบ้างและรีเทิร์นค่าที่คำนวณเสร็จแล้วทางรีจิสเตอร์อะไร

ฟังก์ชัน add_s ใช้บวกค่า R0 และ R1 แล้วเก็บผลลัพธ์ไว้ใน R0 ซึ่งเป็นการดำเนินการอย่างถูกต้องตามคำสั่ง Assembly โดยให้รีจิสเตอร์ R0 และ R1 เก็บค่าพารามิเตอร์ที่รับเข้ามา โดยผลลัพธ์จะแสดงออกมาทาง R0

9. อธิบายว่าเหตุใดฟังก์ชัน add_s จึงไม่ต้องแบ็กอัปค่าของรีจิสเตอร์ LR

add_s ใช้คำสั่ง BX LR เพื่อกลับไปยังที่อยู่ของคำสั่งถัดไปในโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน LR จะเก็บที่อยู่ของคำสั่งที่ต้องกลับไปทำงานต่อหลังจากเรียกฟังก์ชัน เนื่องจาก add_s ไม่ได้เปลี่ยนค่า LR ระหว่างการทำงาน และใช้เพื่อกลับไปยังโปรแกรมต้นทางเท่านั้น จึงไม่จำเป็นต้อง backup ค่าของ LR

ในทางปฏิบัติ การบวกเลขในภาษา C สามารถทำได้โดยใช้เครื่องหมาย + โดยตรง และทำงานได้รวดเร็วกว่า การทดลองตัวอย่างนี้เป็นการนำเสนอว่าผู้อ่านสามารถเขียนโปรแกรมอย่างไรที่จะบรรลุวัตถุประสงค์เท่านั้น ฟังก์ชันภาษาแอสเซมบลีที่จะลิงก์เข้ากับโปรแกรมหลักที่เป็นภาษา C ควรจะมีอรรถประโยชน์มากกว่านี้ และเชื่อมโยงกับฮาร์ดแวร์โดยตรงได้ดีกว่าคำสั่งในภาษา C เช่น ดีไวซ์ไดรเวอร์

10. จงคอมไพล์และลิงก์ด้วย makefile ด้วยคำสั่งต่อไปนี้

```
Lab9_4: main.c add_s.s
gcc -o Lab9_4 main.c add_s.s
```

I.4 กิจกรรมท้ายการทดลอง

1. จงดีบักโปรแกรม Lab9_1 ด้วย GDB พร้อมกันจำนวน 2 Terminal เพื่อแสดงค่าของรีจิสเตอร์ PC ที่รันคำสั่งแรกของโปรแกรม Lab9_1 ในทั้งสองหน้าต่าง และเปรียบเทียบค่า PC ว่าเท่ากันหรือแตกต่างกันหรือไม่ เพราะเหตุใด ทั้งสองมีค่าเหมือนกัน เพราะ

2. หากค่าของรีจิสเตอร์ PC ทั้งสองค่าในข้อ 1 ตรงกัน จงใช้ความรู้เรื่องเวอร์ชวลเมโมรีหรือหน่วยความจำเสมือนในหัวข้อ 6.2 เพื่อตอบคำถาม

3. จงใช้โปรแกรม GDB เพื่อแสดงรายละเอียดของสแต็กระหว่างที่รันโปรแกรม Lab9_2 และบอกลำดับการ PUSH และการ POP ที่เกิดขึ้นภายในโปรแกรมจากแต่ละคำสั่ง

4. จงใช้โปรแกรม GDB เพื่อแสดงรายละเอียดของสแต็กระหว่างที่รันโปรแกรม Lab9_3 และบอกลำดับการ PUSH และการ POP ที่เกิดขึ้นภายในโปรแกรมจากแต่ละคำสั่ง

5. จงนำโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีสำหรับคำนวณค่า mod ในการทดลองที่ 8 มาเรียกใช้ผ่านโปรแกรมภาษา C

6. จงนำโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีสำหรับคำนวณค่า GCD ในการทดลองที่ 8 มาเรียกใช้ผ่านโปรแกรมภาษา C

7. จงดีบักโปรแกรมภาษา C บนโปรแกรม Codeblocks ที่พัฒนาในข้อ 2 และ 3 เพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงของ PC ก่อน ระหว่าง และหลังเรียกใช้ฟังก์ชันภาษา Assembly ว่าเปลี่ยนแปลงอย่างไร และตรงกับทฤษฎีที่เรียนหรือไม่ อย่างไร

8. เครื่องหมาย -g ใน makefile ต่อไปนี้

```
debug: Lab9_1.s
        as -g -o Lab9_1.o Lab9_1.s
```

มีความหมายอย่างไร