รายงานการทดลอง: การแปลงเลขฐานสิบหกเป็นทศนิยมด้วยวิธีลบซ้ำ

การวิเคราะห์และจำลองการคำนวณระดับคาบเวลาของคำสั่งคอมพิวเตอร์ (Example 5-8)

ผู้จัดทำ:

- นายตรัณภพ พิทักษ์กิจไพศาล (รหัสนักศึกษา 6710301007)
- นายอภิสักก์ คงภักดี (รหัสนักศึกษา 6710301009)
- นายธนัท จงธีรธนโชติ (รหัสนักศึกษา 6710301032)

วิชา: Embedded System Design

เสนอ: อาจารย์คทาเทพ สวัสดิพิศาล

ภาคการศึกษา: 1/2569

สถาปัตยกรรม: AVR (ATmega328P)

เครื่องมือ: Atmel Studio 7.0 & Simulator

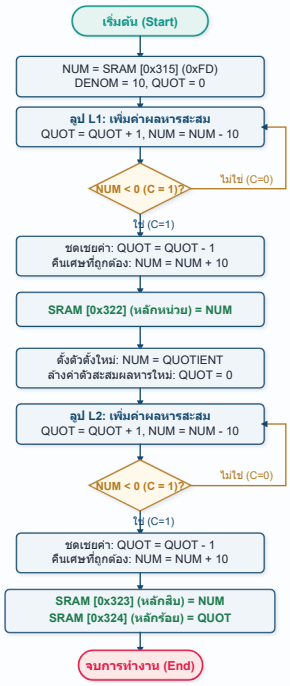
1 การวิเคราะห์กลไกและขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม (Program Logic Analysis)

ในสถาปัตยกรรมไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็ก เช่น AVR ATmega328P ซึ่งจัดเป็นหน่วยประมวลผลแบบ RISC ไม่มีชุดคำสั่งฮาร์ดแวร์สำหรับหารเลข (Hardware Division) มาให้ในตัวชิป มีเพียงคำสั่งคูณ (MUL) เท่านั้น ดังนั้น การดำเนินการหารข้อมูลในระดับซอฟต์แวร์จึงมีความจำเป็น โดยวิธีพื้นฐานที่มีประสิทธิภาพและสิ้นเปลืองทรัพยากรระบบต่ำที่สุดสำหรับข้อมูลขนาด 8 บิต คือ **วิธีการหักลบออกซ้ำ ๆ (Repeated Subtraction)** ด้วยตัวหาร

โปรแกรมจำลอง Example 5-8 นี้ ทำหน้าที่แปลงข้อมูลเลขฐานสิบหกขนาด 8 บิต (ในที่นี้คือค่า `0xFD` หรือ 253 ในระบบเลขฐานสิบ) ซึ่งอ่านมาจากแรม SRAM ตำแหน่ง `0x315` ให้กลายเป็นเลขฐานสิบแยกหลัก BCD จำนวน 3 หลัก เพื่อนำไปเตรียมแสดงผล โดยหลักการทำงานจะแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 รอบหลัก ดังนี้:

1. การหารอบที่ 1 (หาหลักหน่วย): นำค่าตัวตั้งเริ่มต้น (253) มาหักลบออกด้วยตัวหารคงที่ 10 ไปเรื่อย ๆ ในลูป `L1` พร้อมทั้งนับจำนวนครั้งที่หักลบได้สะสมไว้ในตัวแปรผลหาร (Quotient) เมื่อผลลัพธ์การลบมีค่าต่ำกว่าศูนย์ (เกิด carry flag = 1 จากการกู้ยืม) วงจรจะออกจากลูป จากนั้นชดเชยค่าผลหารที่นับเกินไป 1 ครั้ง และบวกตัวหาร 10 คืนกลับไปที่ตัวตั้งเดิมเพื่อหาเศษที่เหลือ เศษลัพธ์สุดท้ายนี้คือ **ตัวเลขหลักหน่วย (ค่า 3)** ซึ่งจะบันทึกเก็บลงแรมตำแหน่ง `0x322` ส่วนผลหารรอบนี้ (ค่า 25) จะถูกส่งไปคำนวณในรอบถัดไป

2. การหารอบที่ 2 (หาหลักสิบและร้อย): นำผลหารที่ได้จากรอบแรก (25) มาตั้งเป็นตัวตั้งใหม่ ทำการหักลบด้วยตัวหาร 10 ซ้ำในลูป `L2` ในลักษณะเดิม เศษที่เหลือหลังการลบจนเกิดค่ายืมจะกลายเป็น **ตัวเลขหลักสิบ (ค่า 5)** นำไปบันทึกที่ตำแหน่ง `0x323` และผลหารที่เหลือสุทธิรอบนี้จะกลายเป็น **ตัวเลขหลักร้อย (ค่า 2)** บันทึกลงตำแหน่ง `0x324` สิ้นสุดขั้นตอนโปรแกรม



รูปที่ 1 แผนผังลำดับขั้นตอนการทำงาน (Flowchart) ของโปรแกรมแยกหลัก BCD แบบลบซ้ำ

2 โค้ดโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีที่สมบูรณ์ (AVR Assembly Program)

ซอร์สโค้ดแอสเซมบลีสำหรับชิปไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328P ซึ่งผ่านการตรวจสอบความถูกต้องและคอมไพล์สำเร็จ:

```
;=====================================================================
; exercise_5_8.asm
; แปลงค่า Hex 8 บิตที่ตำแหน่ง 0x315 เป็นตัวเลขทศนิยม (BCD) 3 หลักในแรม
;=====================================================================

.include "m328pdef.inc"    ; นำเข้าไฟล์ระบุนิยามของขาและรีจิสเตอร์ชิป
.list                      ; แสดงการออกไฟล์แจกแจงรายการคอมไพล์ (.lst)

    rjmp main              ; เริ่มต้นข้ามไปยังส่วนโปรแกรมหลักหลังสัญญาณ Reset

.EQU HEX_NUM = 0x315       ; ตำแหน่ง SRAM ที่เก็บเลขต้นทาง (0xFD = 253)
.EQU RMND_L  = 0x322       ; ตำแหน่ง SRAM เก็บเศษหลักหน่วย
.EQU RMND_M  = 0x323       ; ตำแหน่ง SRAM เก็บเศษหลักสิบ
.EQU RMND_H  = 0x324       ; ตำแหน่ง SRAM เก็บเศษหลักร้อย

.DEF NUM         = R20     ; ตัวแปรเก็บตัวเลขคำนวณสะสม
.DEF DENOMINATOR = R21     ; รีจิสเตอร์เก็บค่าคงที่ 10 (ตัวหาร)
.DEF QUOTIENT    = R22     ; รีจิสเตอร์เก็บผลหารสะสมประจำรอบ

main:
    LDI  R16, 0xFD          ; โหลดตัวเลข 253 (0xFD) ลงใน R16
    STS  HEX_NUM, R16       ; บันทึกค่านำเข้าไว้ในหน่วยความจำตำแหน่ง 0x315
    LDS  NUM, HEX_NUM       ; ดึงค่าจาก 0x315 มาพักในรีจิสเตอร์หลัก NUM
    LDI  DENOMINATOR, 10    ; กำหนดค่าตัวหารคงที่เท่ากับ 10
    CLR  QUOTIENT           ; ล้างค่าสะสมผลหารเริ่มแรกให้เป็น 0

L1:
    INC  QUOTIENT           ; บวกเพิ่มผลหารประจำรอบขึ้น 1 ครั้ง
    SUB  NUM, DENOMINATOR   ; ทำการลบตัวตั้งออกด้วยตัวหารคงที่ 10
    BRCC L1                 ; วนซ้ำลูป L1 หาก Carry Flag เป็น 0 (NUM >= 0)
    DEC  QUOTIENT           ; หักลบชดเชยรอบผลหารที่เกินไป 1 ครั้ง
    ADD  NUM, DENOMINATOR   ; บวกตัวหารกลับคืนเพื่อรับค่าเศษเหลือหลักหน่วย
    STS  RMND_L, NUM        ; บันทึกผลหลักหน่วย (3) ไว้ที่ SRAM 0x322

    MOV  NUM, QUOTIENT      ; ย้ายผลหารรอบที่แล้ว (25) มาตั้งเป็นตัวตั้งใหม่
    LDI  QUOTIENT, 0        ; ล้างผลหารรอบใหม่เพื่อเตรียมตัวนับในลูป L2

L2:
    INC  QUOTIENT           ; บวกเพิ่มผลหารประจำรอบขึ้น 1 ครั้ง
    SUB  NUM, DENOMINATOR   ; หักลบออกด้วย 10 ซ้ำ
    BRCC L2                 ; วนซ้ำลูป L2 หาก Carry Flag เป็น 0
    DEC  QUOTIENT           ; หักลบชดเชยรอบผลหารที่เกินไป 1 ครั้ง
    ADD  NUM, DENOMINATOR   ; บวกคืนค่าคงที่ 10 เพื่อรับเศษเหลือหลักสิบ
    STS  RMND_M, NUM        ; บันทึกผลหลักสิบ (5) ไว้ที่ SRAM 0x323
    STS  RMND_H, QUOTIENT   ; บันทึกผลหลักร้อยสุทธิ (2) ไว้ที่ SRAM 0x324

here:
    rjmp here              ; วนจบลูปค้างไว้ตลอดไป
```

3 ผลการจำลองการทำงานระดับคาบเวลาและหน่วยความจำ (Simulation Results)

การวิเคราะห์เชิงลึกผ่านการจำลองโปรแกรมจำลองของ Atmel Studio 7.0 พบพฤติกรรมของสเตตและรีจิสเตอร์ในจังหวะสำคัญ ๆ ดังตารางบันทึกการประมวลผล (SRAM Trace) ด้านล่าง:

ตารางที่ 2 บันทึกการจำลองการทำงานของรีจิสเตอร์สำคัญตามคาบเวลาประมวลผล (สรุปส่วนจุดเปลี่ยนสำคัญ)

คาบเวลา (Cycle)	PC	คำสั่ง (Instruction)	สถานะของรีจิสเตอร์	ค่าใน SRAM ปัจจุบัน	Carry
0	-	- (ก่อนเริ่มโปรแกรม)	R16=00, NUM=00, DENOM=00, QUOT=00	-	0
การคำนวณในลูป L1 (หักลบค่าครั้งที่ 1, 25 และ 26 ตามลำดับ)					
7	0x0007	INC QUOTIENT (รอบที่ 1)	R16=FD, NUM=253, DENOM=10, QUOT=01	[0x315] = 0xFD	0
8	0x0008	SUB NUM, DENOMINATOR	R16=FD, NUM=243, DENOM=10, QUOT=01	[0x315] = 0xFD	0
80	0x0008	SUB NUM, DENOMINATOR (รอบ 25)	R16=FD, NUM=3, DENOM=10, QUOT=25	[0x315] = 0xFD	0
82	0x0007	INC QUOTIENT (รอบที่ 26)	R16=FD, NUM=3, DENOM=10, QUOT=26	[0x315] = 0xFD	0
83	0x0008	SUB NUM, DENOMINATOR	R16=FD, NUM=249 (-7), DENOM=10, QUOT=26	[0x315] = 0xFD	1
84	0x0009	BRCC L1 (ไม่กระโดด)	R16=FD, NUM=249, DENOM=10, QUOT=26	[0x315] = 0xFD	1
85	0x000A	DEC QUOTIENT (ชดเชยรอบเกิน)	R16=FD, NUM=249, DENOM=10, QUOT=25	[0x315] = 0xFD	1
86	0x000B	ADD NUM, DENOMINATOR (คืนเศษบวก)	R16=FD, NUM=3 (เศษหลักหน่วย), DENOM=10, QUOT=25	[0x315] = 0xFD	0
88	0x000C	STS RMND_L, NUM	R16=FD, NUM=3, DENOM=10, QUOT=25	[0x322] = 0x03 (บันทึกหลักหน่วย)	0
การคำนวณในลูป L2 (หารรอบที่สอง: นำ 25 มาหารต่อด้วย 10 ทั้งหมด 3 ครั้ง)					
89	0x000E	MOV NUM, QUOTIENT	R16=FD, NUM=25, DENOM=10, QUOT=25	[0x322] = 0x03	0
90	0x000F	LDI QUOTIENT, 0	R16=FD, NUM=25, DENOM=10, QUOT=00	[0x322] = 0x03	0
93	0x0011	SUB NUM, DENOMINATOR (รอบ 2)	R16=FD, NUM=5, DENOM=10, QUOT=02	[0x322] = 0x03	0
97	0x0011	SUB NUM, DENOMINATOR (รอบ 3)	R16=FD, NUM=251 (-5), DENOM=10, QUOT=03	[0x322] = 0x03	1
99	0x0013	DEC QUOTIENT (ชดเชยรอบเกิน)	R16=FD, NUM=251, DENOM=10, QUOT=02	[0x322] = 0x03	1
100	0x0014	ADD NUM, DENOMINATOR (คืนเศษบวก)	R16=FD, NUM=5 (เศษหลักสิบ), DENOM=10, QUOT=02	[0x322] = 0x03	0
102	0x0015	STS RMND_M, NUM	R16=FD, NUM=5, DENOM=10, QUOT=02	[0x322]=03, [0x323]=05	0
104	0x0017	STS RMND_H, QUOTIENT	R16=FD, NUM=5, DENOM=10, QUOT=02	[0x322]=03, [0x323]=05, [0x324]=02	0

3.1 ผลลัพธ์ข้อมูลจำลองบนระบบ SRAM (SRAM Memory Map Dump)

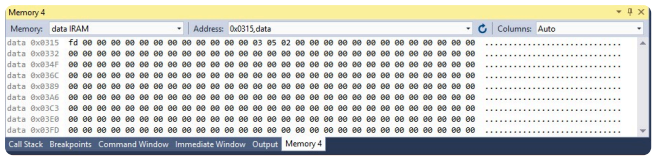
ผลลัพธ์การบันทึกค่าลงหน่วยความจำประเภท SRAM ณ สิ้นสุดการจำลองของโปรแกรม ซึ่งแยกหลักออกมาเป็น BCD ได้ถูกต้อง:

ช่วงตำแหน่งแรม (Address Block)	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7
0x0310	00	00	00	00	00	FD	00	00
0x0320	00	00	03	05	02	00	00	00

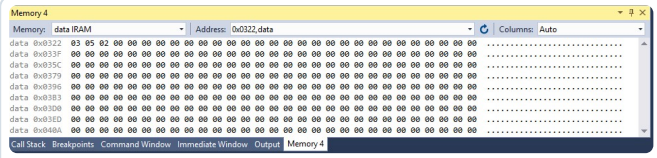
*หมายเหตุ: ที่อยู่ 0x315 เก็บค่านำเข้า FD (253) และเก็บผลลัพธ์แยกหลัก 3, 5, 2 ที่หน่วยความจำ 0x322, 0x323, 0x324 ตามลำดับ

3.2 ภาพถ่ายบันทึกผลการจำลองหน่วยความจำ (Simulation memory screenshots)

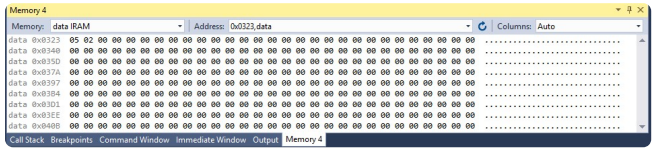
ภาพแสดงตำแหน่งหน่วยความจำที่เกี่ยวข้องจากการจำลองการทำงานจริงใน Atmel Studio 7.0 Memory Window:



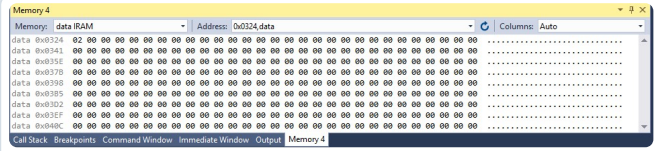
รูปที่ 2.1 แสดงค่าในแรมเริ่มจากที่อยู่ 0x0315 (ค่าตั้งต้น 0xFD และผล BCD)



รูปที่ 2.2 แสดงหลักหน่วยเริ่มจากที่อยู่ 0x0322 (0x03)



รูปที่ 2.3 แสดงหลักสิบเริ่มจากที่อยู่ 0x0323 (0x05)



รูปที่ 2.4 แสดงหลักร้อยเริ่มจากที่อยู่ 0x0324 (0x02)