



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)  
ปริญญา

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาระบบบันทึกข้อมูลสำหรับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่องชนิดพกพาโดยใช้  
เอสดีการ์ด

Development of Data Storage System for Portable Multichannel Analyzer using SD Card

นามผู้วิจัย นายชเนต สุขสมพงษ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สุกประเสริฐ, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( รองศาสตราจารย์นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ, วท.ค. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ เชียงกา, Dr.rer.nat. )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สุกประเสริฐ, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาระบบบันทึกข้อมูลสำหรับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่องทางพกพาโดยใช้  
เอสดีการ์ด

Development of Data Storage System for Portable Multichannel Analyzer using SD Card

โดย

นายธนศ สุขสมพงษ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อขอความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

พ.ศ. 2552

ธนส สุขสมพงษ์ 2552: การพัฒนาระบบบันทึกข้อมูลสำหรับเครื่องวิเคราะห์  
สัญญาณหลายช่องชนิดพกพาโดยใช้เอสดีการ์ด ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
(รังสีประยุกต์และไอโซโทป) สาขารังสีประยุกต์และไอโซโทป ภาควิชา  
รังสีประยุกต์และไอโซโทป อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สุกประเสริฐ, Ph.D. 95 หน้า

ได้พัฒนาระบบบันทึกข้อมูลของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง (MCA) ชนิดพกพา  
โดยการนำเอสดีการ์ด (SD card) มาเป็นส่วนบันทึกข้อมูลแทนส่วนบันทึกแบบเก่าที่ไม่สะดวกใน  
การเพิ่มหรือเปลี่ยนส่วนบันทึกข้อมูลของเครื่อง ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน ส่วนแรก  
ศึกษาการตรวจจับสัญญาณพัลส์โดยการออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ทางเข้า ส่วนที่สอง  
เป็นการทดสอบความถูกต้องของระบบบันทึกข้อมูลของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้น ได้แก่  
การศึกษาและออกแบบวงจรติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับเอสดีการ์ด ความถูกต้องใน  
การเก็บค่าสัญญาณพัลส์ทางเข้าลงสู่เอสดีการ์ด และความสามารถในการบันทึกผลการวัดรังสี

ผลการศึกษาพบว่าวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ที่ได้ออกแบบขึ้น สามารถตรวจจับยอด  
พัลส์ จากนั้นจะส่งสัญญาณให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อประมวลผลข้อมูล โดย  
ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถเชื่อมต่อกับเอสดีการ์ดได้ในรูปแบบ SPI MODE การทดสอบความ  
ถูกต้องในการเก็บค่าสัญญาณพัลส์ทางเข้าลงสู่เอสดีการ์ด พบว่าเครื่อง MCA ชนิดพกพาสามารถ  
ตรวจจับสัญญาณพัลส์ทางเข้าได้ดีในช่วง 0.2 โวลต์ ถึง 5.0 โวลต์ และยังสามารถบันทึกผลการวัด  
ลงเอสดีการ์ด ในรูปของแฟ้มนามสกุล .xls ซึ่งสามารถเปิดดูผลการวัดได้โดยโปรแกรมที่รองรับ  
นามสกุลดังกล่าว เช่น โปรแกรม Microsoft Excel หรือ Open Office เพื่อมาสร้างเป็นสเปรดชีต  
พลังงานของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ทำการวัดได้

Tanate Suksompong 2009: Development of Data Storage System for Portable Multichannel Analyzer using SD Card. Master of Science (Applied Radiation and Isotopes), Major Field: Applied Radiation and Isotopes, Department of Applied Radiation and Isotopes. Thesis Advisor: Assistant Professor Wanwisa Sudprasart. Ph.D. 95 pages.

The development of data storage system for portable multichannel analyzer (MCA) focused on the application of SD card as a storage device instead of the older devices that could not easily extend their capacity. The entire work consisted of two parts: the first part was the study for pulse detection by designing the input pulse detecting circuit. The second part dealt with the accuracy testing of data storage system for portable MCA, consisting of the design of connecting circuit between microcontroller and SD card, the transfer of input pulse data into SD card and the ability of data storage system for radiation detection.

It was found that the input pulse detecting circuit could detect the input pulse with the maximum voltage, then the signal was transferred to microcontroller for data processing. The microcontroller could connect to SD card via SPI MODE. The portable MCA could perfectly verify the input signal ranging from 0.2 to 5.0 volts. The SD card could store the data as “.xls” file which could easily be accessed by the compatible software such as Microsoft Excel or Open Office. The energy spectrum of the measured radionuclide could accordingly be generated.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

/ /

## กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สุคตประเสริฐ รองศาสตราจารย์นวลจิวิ  
รุ่งชนเกียรติ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ เชียงกา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐวิจักก์ เงินวิจิตร ที่ให้  
คำปรึกษาในการวางแผนการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำเกี่ยวข้องกับ  
วิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทปทุกท่าน ที่ให้ความรู้ด้าน  
วิชาการรวมทั้งด้านการดำเนินชีวิต ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการนำมาเป็นหลักในการทำงานและ  
การดำเนินชีวิตต่อไป และขอกราบขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป ทุก  
ท่านที่ให้การช่วยเหลือทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ภายใต้โครงการ  
สนับสนุนทุนวิจัยด้านความปลอดภัยจากการใช้พลังงานปรมาณู

สุดท้ายนี้ประโยชน์ที่วิทยานิพนธ์เล่มนี้พึงมี ผู้เขียนขอขอบแต่ คุณพ่อ คุณแม่ คณาจารย์  
ทุกท่าน รวมถึงผู้ที่ให้การช่วยเหลือและสนับสนุนจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ธเนศ สุขสมพงษ์

พฤษภาคม 2552

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	48
ผล	48
วิจารณ์	48
สรุปและข้อเสนอแนะ	60
สรุป	60
ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	62
ภาคผนวก	65
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	95

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	รหัสไมโครคอนโทรลเลอร์และคุณสมบัติ	11
2	หน้าที่ของแต่ละขาของวงจรรวม PKD01	20
3	รูปแบบการทำงานของวงจรรวม PKD01	22
4	ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทำงาน	27
5	รายละเอียดของตัวแปร CID	29
6	ชื่อเรียก และหน้าที่ของแต่ละขาของจเรสดีการ์ด์	31
7	รายละเอียดขาสัญญาณต่างๆ เมื่อใช้การเชื่อมต่อแบบ SD MODE	32
8	รายละเอียดขาสัญญาณต่างๆ เมื่อใช้การเชื่อมต่อแบบ SPI MODE	32
9	ช่องที่สัมพันธ์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้า	45
10	การเขียนข้อมูลลงเอสดีการ์ด์ของไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละรหัส	54
11	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพา	57
<b>ตารางผนวกที่</b>		
1	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.2 โวลต์	70
2	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.4 โวลต์	71
3	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์	72
4	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์	73
5	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.0 โวลต์	74

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
6	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.2 โวลต์	75
7	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.4 โวลต์	76
8	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.6 โวลต์	77
9	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.8 โวลต์	78
10	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.0 โวลต์	79
11	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.2 โวลต์	80
12	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.4 โวลต์	81
13	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.6 โวลต์	82
14	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์	83
15	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3.0 โวลต์	84
16	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3.2 โวลต์	85
17	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3.4 โวลต์	86

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
18	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3.6 โวลต์	87
19	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3.8 โวลต์	88
20	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4.0 โวลต์	89
21	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4.2 โวลต์	90
22	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4.4 โวลต์	91
23	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4.6 โวลต์	92
24	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4.8 โวลต์	93
25	ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5.0 โวลต์	94

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง	5
2	ส่วนประกอบของเครื่อง MCA ชนิดพกพา	6
3	แผนผังการทำงานของเครื่องแปลงแบบประมาณค่าหลายครั้ง	13
4	แสดงแผนผังวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล	14
5	แสดงส่วนประกอบภายในวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล	15
6	วงจรตรวจจับค่าสูงสุดเบื้องต้น	17
7	วงจรตรวจจับค่าสูงสุดที่มีการปรับปรุง	18
8	ตำแหน่งขาของวงจรรวม PKD01	19
9	แสดงวงจรภายในของ PKD01	21
10	วงจรตรวจจับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดภายในวงจรรวม PKD01	21
11	แสดงอินพุตและเอาต์พุตในแบบการทำงาน PEAK DETECT ของวงจรรวม PKD01	22
12	แสดงอินพุตและเอาต์พุตในแบบการทำงาน PEAK DETECT ที่ใช้เวลา RESET 150 $\mu$ s ของวงจรรวม PKD01	23
13	ลักษณะเอสดีการ์ด	24
14	แสดงสวิตช์เลื่อนเอสดีการ์ด	25
15	โครงสร้างภายในของเอสดีการ์ด	26
16	แสดงขาของเอสดีการ์ด	30
17	การติดต่อแบบ SPI MODE ของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F876 กับเอสดีการ์ด	33
18	แสดงการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับเอสดีการ์ด และเอ็มเอ็มซีการ์ดแบบ SPI MODE	34
19	การต่อวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์	36
20	ผังการทำงานของโปรแกรมทดสอบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์	37

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	การต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์มาตรฐานเข้ากับวงจรที่ออกแบบเพื่อวัดสัญญาณตรวจจับยอดพัลส์	38
22	การต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์มาตรฐานเข้ากับวงจรที่ออกแบบเพื่อทดสอบการคงค่ายอดพัลส์	39
23	ผังการทำงานของโปรแกรมหลัก	41
24	ผังการทำงานของโปรแกรมในส่วนการ Interrupt	42
25	การต่ออุปกรณ์ในการทดสอบการเก็บยอดสัญญาณพัลส์ทางเข้าลงสู่ช่อง	43
26	วงจรในการทดสอบความถูกต้องในการเก็บยอดสัญญาณพัลส์ทางเข้าลงสู่ช่อง	44
27	การจัดอุปกรณ์ในการทดสอบความสามารถในการตรวจวัดรังสี	47
28	หัววัดรังสีและการจัดชุดตะกั่วกำบังรังสี	47
29	ผังวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์	48
30	วงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการทดลอง	48
31	สัญญาณทางออกการตรวจจับยอดพัลส์	50
32	สัญญาณทางออกการคงค่าสัญญาณพัลส์สูงสุด	51
33	ช่วงเวลา dead time ของเครื่อง MCA ชนิดพกพา	51
34	วงจรติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับเอสดีการ์ด	53
35	รูปแบบข้อมูลที่เขียนลงสู่เอสดีการ์ด	54
36	ความกว้างและยาวของแผ่นวงจรพิมพ์ของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้น	55
37	ความหนาของแผ่นวงจรพิมพ์ของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้น	55
38	แสดงวงจรเครื่อง MCA ที่พัฒนาขึ้น	56
39	ความสัมพันธ์ระหว่างช่องที่เก็บยอดพัลส์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าทางเข้า	58
40	สเปกตรัมพลังงานของ Cs-137 จากเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้น	59
41	สเปกตรัมพลังงานของ CS-137 จากเครื่อง MCA มาตรฐาน	59

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
1	เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์มาตรฐาน (Pulser) บริษัท Canberra รุ่น 807 (ขวา) และ โมดูลขยายสัญญาณพัลส์ (Amplifier) บริษัท Canberra รุ่น 2022 (ซ้าย)	66
2	ขนาดวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการทดลอง	66
3	ไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส PIC18F2620 ของเครื่อง MCA ชนิดพกพา	67
4	เครื่อง MCA ชนิดพกพา ที่อยู่ระหว่างการวิจัย	67
5	เครื่อง MCA ชนิดพกพา ในรูปแบบการทำแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB)	68
6	ลักษณะข้อมูลในเอสดีการ์ดเมื่อเปิดอ่านด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งพบว่าข้อมูลอยู่ในรูป Microsoft Excel	68
7	การนำข้อมูลการวัดรังสีจากเอสดีการ์ดมาเขียนกราฟใน Microsoft Excel	69
8	สเปคตรัมซีซีเอ็ม - 137 จากเครื่อง MCA รุ่น TRUMP ของบริษัท ORTEC	69

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ADC	=	วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล
Channel	=	ช่องของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง ทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่ได้จากการวัด
DAC	=	วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก
D/A	=	วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก
IC	=	วงจรรวม (Integrated Circuit)
Interrupt	=	คือ การขัดจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำงานภายใต้คำสั่งใน Interrupt เมื่อทำเสร็จ โปรแกรมจะกลับไปทำงานในส่วนที่ค้างไว้ก่อนการถูกขัดจังหวะ
MCA	=	เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง
$\mu\text{Ci}$	=	ไมโครคูรี
MCU	=	ไมโครคอนโทรลเลอร์
pF	=	พิโคฟารัด
PIC18F2525	=	รหัสของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ผลิตโดยบริษัท Microchip
PIC18F2620	=	รหัสของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ผลิตโดยบริษัท Microchip
PIC18F2680	=	รหัสของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ผลิตโดยบริษัท Microchip
PKD01	=	รหัสวงจรรวมของบริษัท Analog device
$R^2$	=	สหสัมพันธ์เชิงเส้น
SPI MODE	=	รูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์สองตัวขึ้นไป

# การพัฒนาระบบบันทึกข้อมูลสำหรับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่องชนิดพกพาโดยใช้เอสดีการ์ด

## Development of Data Storage System for Portable Multichannel Analyzer using SD Card

### คำนำ

ปัจจุบันมีการนำรังสีมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ในด้านการแพทย์ อุตสาหกรรม การเกษตร และงานวิจัย ซึ่งการนำรังสีมาใช้ประโยชน์นี้จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือสำหรับตรวจวัดรังสีชนิดต่างๆ เพื่อตรวจวัดรังสีที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสี โดยอุปกรณ์ที่ใช้มีอยู่หลายลักษณะขึ้นอยู่กับการใช้งาน และประเภทของรังสี

เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง (Multichannel analyzer, MCA) ชนิดพกพา เป็นเครื่องมือสำหรับงานตรวจวัดรังสีที่นักวิจัยให้ความสนใจ เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่มีสมรรถนะสูง คือ มีความสามารถในการเก็บข้อมูลได้อย่างละเอียด แสดงระดับพลังงานและปริมาณของรังสีได้อีกทั้งยังมีขนาดเล็กทำให้สามารถพกพาได้สะดวก อย่างไรก็ตามเครื่อง MCA ชนิดพกพาโดยทั่วไปมักมีข้อบกพร่องในเรื่องหน่วยความจำที่จำกัด และไม่สามารถเพิ่มความจุของหน่วยความจำได้ ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดในการเก็บข้อมูล

งานวิจัยนี้จึงเลือกทำการพัฒนาในส่วนของระบบบันทึกข้อมูลของเครื่อง MCA ชนิดพกพา โดยเลือกใช้เอสดีการ์ด (secure digital card, SD card) ในการบันทึกข้อมูลเพื่อแก้จุดบกพร่องที่มักพบจากเครื่อง MCA ทั่วไป เนื่องจากเอสดีการ์ดมีข้อดีที่เหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นส่วนบันทึกข้อมูลของเครื่องหลายประการเช่น มีระบบรักษาความปลอดภัยของข้อมูลที่ดี มีความจุมาก ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำ ราคาถูก ขนาดเล็กพกพาสะดวก และมีรูปแบบมาตรฐานสากล ดังนั้นการนำเอสดีการ์ดมาประยุกต์ใช้กับเครื่อง MCA ชนิดพกพา จึงเป็นการเพิ่มความสะดวกในการใช้งาน และการถ่ายโอนข้อมูลที่ได้ไปยังอุปกรณ์อื่นๆ ทำให้การใช้งานเครื่อง MCA มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับงาน นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดรังสีโดยใช้อุปกรณ์และเทคโนโลยีภายในประเทศต่อไป

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาระบบบันทึกข้อมูลของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่องชนิดพกพาโดยใช้เอสดีการ์ด
2. เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้น

### ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาการตรวจจับสัญญาณพัลส์
  - ออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์
  - ทดสอบการทำงานของวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์
2. ทดสอบความถูกต้องของระบบบันทึกข้อมูลของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้น
  - ศึกษา และออกแบบวงจรติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับเอสดีการ์ด
  - ทดสอบความถูกต้องในการเก็บค่าสัญญาณพัลส์ทางเข้าสู่เอสดีการ์ด
  - ทดสอบความสามารถในการตรวจจับ และบันทึกผลการวัดรังสี

## การตรวจเอกสาร

### ระบบการวัดรังสี

ระบบการวัดรังสีแบ่งเป็น 3 ระบบดังนี้

1. ระบบการนับรวม เป็นระบบการนับที่ต้องการทราบเพียงว่ามีรังสีอยู่หรือไม่ มีปริมาณมากน้อยเท่าใด โดยไม่คำนึงถึงพลังงานรังสีที่วัดอยู่

2. ระบบการวัดรังสีแบบแยกพลังงาน ระบบวัดรังสีแบบนี้จำแนกเป็น ระบบการวัดรังสีโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณช่องเดี่ยว (SCA) และระบบการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง (MCA)

3. ระบบโคอินซิเดนซ์ และแอนติโคอินซิเดนซ์ ในหัววัดรังสีบางครั้งมีความจำเป็นต้องตรวจสอบเหตุการณ์ทางนิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน เช่น การวัดกัมมันตภาพของสารตัวอย่างที่ให้รังสีออกมา 2 ชนิดหรือมากกว่า การวัดสารรังสีที่มีอายุครึ่งชีวิตสั้น หรือในกรณีที่สารรังสีมีความแรงรังสีต่ำ ๆ ซึ่งจำเป็นต้องตัดสัญญาณรบกวนออก เช่น สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากรังสีคอสมิก ซึ่งนอกจากระบบกำบังรังสี (shielding) จะช่วยตัดสัญญาณจากภายนอกแล้ว อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถช่วยได้ คือ ระบบโคอินซิเดนซ์ และแอนติโคอินซิเดนซ์

ระบบการวัดรังสีดังกล่าวทั้ง 3 ระบบ มีหลักการทำงาน และการนำไปใช้ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยในการศึกษาครั้งนี้เน้นอธิบาย ระบบการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่องเท่านั้น

### เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง

เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง (Multichannel Analyzer, MCA) พร้อมหัววัดรังสี เป็นเครื่องวัดรังสีชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในการตรวจวัดรังสี เนื่องจากสามารถเก็บข้อมูลได้อย่างละเอียดคือสามารถแสดงจำนวนอนุภาคที่ตกกระทบหัววัด และยังสามารถแสดงระดับพลังงานของรังสีได้

การทำงานของเครื่องเริ่มจาก เมื่อรังสีตกกระทบหัววัด จะเกิดอันตรกิริยาขึ้น ส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในหัววัดขึ้น ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะถูกส่งเข้าสู่เครื่อง MCA ในลักษณะสัญญาณพัลส์ ซึ่งเครื่องจะทำหน้าที่วิเคราะห์ความสูงพัลส์ แล้วเก็บเข้าสู่หน่วยเก็บแต่ละหน่วยเรียกว่าช่อง (Channel) ซึ่งช่องที่แบ่งไว้จะทำหน้าที่เก็บจำนวนพัลส์ที่มีความสูงตามที่ได้กำหนดไว้ และจำนวนพัลส์ที่เก็บอยู่ในแต่ละช่องจะแสดงถึงจำนวนอนุภาค และพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ เมื่อสิ้นสุดการวัดรังสี ค่าจำนวนอนุภาค และพลังงานในแต่ละช่องจะถูกแจกแจงในรูปแบบของกราฟ

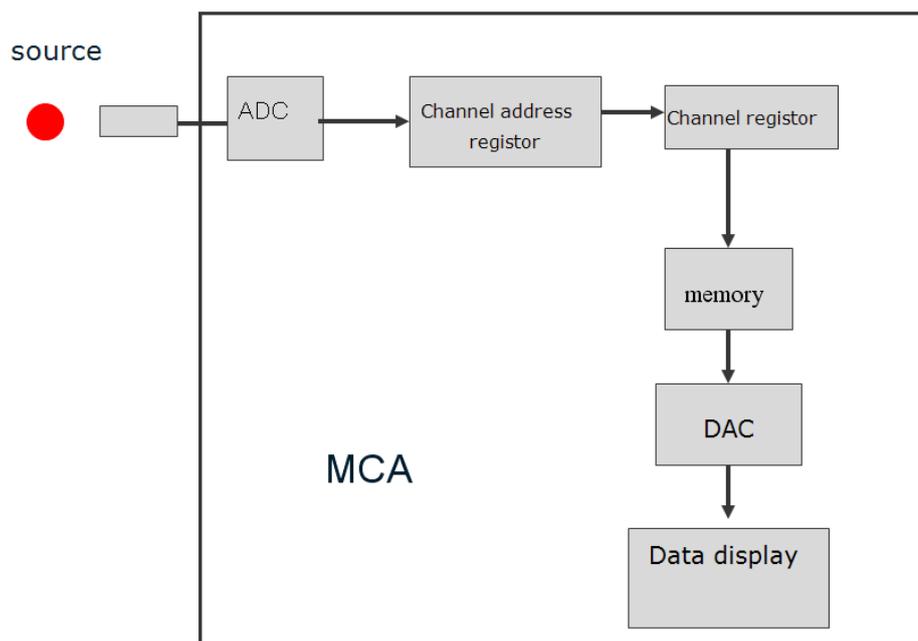
การศึกษาส่วนประกอบของเครื่อง MCA เป็นสิ่งหนึ่งที่สามารถทำให้เข้าใจถึงขั้นตอนและวิธีการทำงานของเครื่องได้เป็นอย่างดี ซึ่ง นวลฉวี (2536) ได้ทำการศึกษา และอธิบายถึงส่วนประกอบหลักของเครื่อง MCA ไว้ดังนี้

- ภาคเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (analog to digital convertor, ADC) มีหน้าที่เปลี่ยนความสูงสัญญาณพัลส์จากภาคขยายส่วนหน้าเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีขนาดมาตรฐานจำนวนต่างๆ
- ภาคเลือกตำแหน่งแชนแนล (channel address register) ทำหน้าที่ในการรับรหัสดิจิทัลจากภาคเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นเลือกตำแหน่งช่องในหน่วยความจำที่ตรงกับรหัสของพัลส์ เพื่อให้ภาคบันทึกข้อมูล (data register) บวกจำนวนพัลส์ที่มีรหัสตรงกับตำแหน่งช่องใดๆ ครั้งละ 1 หน่วยนับ หรือเป็นคำสั่งลบเพื่อหักลบออก จำนวนพัลส์ที่มีอยู่เดิมออก ครั้งละ 1 หน่วยนับ จากข้อมูลที่บันทึกไว้
- ภาคบันทึกข้อมูล (channel register) ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดข้อมูลในหน่วยความจำของตำแหน่งช่องแชนแนลครั้งละ 1 หน่วยนับ เมื่อมีพัลส์ที่มีรหัสตรงกับตำแหน่งแชนแนล นั้นๆ เข้ามาแต่ละครั้ง ในช่วงเวลาที่เครื่องทำงานตั้งแต่รับสัญญาณ จากนั้นเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลจนกระทั่งเก็บข้อมูล หากมีสัญญาณใหม่เข้ามาเครื่องจะไม่ยอมรับสัญญาณนั้น เครื่องจะยอมรับสัญญาณใหม่เข้ามาถัดเมื่อ การบันทึกข้อมูลของสัญญาณนั้นเสร็จเรียบร้อยแล้ว
- ภาคหน่วยความจำ (memory) ส่วนนี้จะบันทึกจำนวนอนุภาคของแต่ละตำแหน่งแชนแนล ในรูปของรหัสไบนารี (binary) ซึ่งจำนวนแชนแนลหรือช่องจะมีค่าเท่ากับ  $2^n$  โดยจำนวน

ของเซนแนลนี้จะสัมพันธ์กับขีดความสามารถของ ADC ซึ่งหมายถึงความละเอียดของการแบ่งระดับพลังงานของรังสีที่ทำการวัด

- ภาคแสดงผล (data display) ข้อมูลที่บันทึกไว้ในหน่วยความจำจะถูกแสดงบนจอภาพด้วยการส่งรหัสดิจิทัลจากตำแหน่งเซนแนลต่าง ๆ ผ่านวงจรเปลี่ยนสัญญาณจากดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC) แล้วแสดงผลในรูปสเปกตรัม

- ภาคเชื่อมโยงกับอุปกรณ์ภายนอก ทำหน้าที่เชื่อมโยงกับอุปกรณ์ภายนอก เช่น เครื่องเขียนกราฟ เครื่องพิมพ์

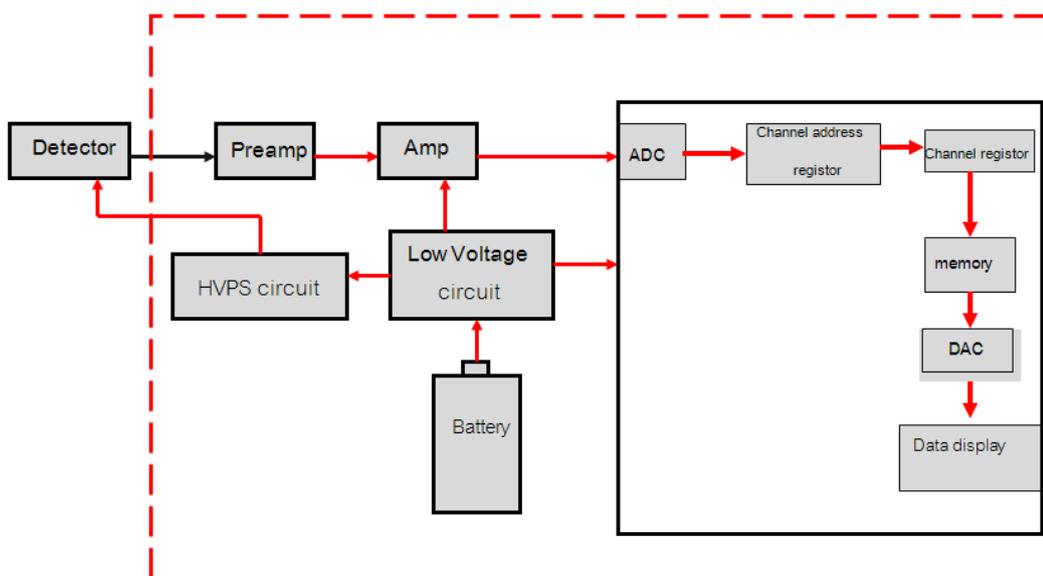


ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง

ที่มา: ชวัช (2541)

## เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่องชนิดพกพา

เครื่อง MCA ชนิดพกพา (Portable Multichannel Analyzer) พร้อมหัววัดรังสีเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีที่ได้รับความนิยมชนิดหนึ่งเนื่องจาก มีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าเครื่อง MCA แบบตั้งอยู่กับที่ เนื่องจากมีขนาดเล็ก และสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย จึงเหมาะกับงานวัดรังสีที่ต้องการมีการย้ายสถานที่วัดหรือเก็บข้อมูล โดยองค์ประกอบในส่วนอื่นๆ เช่น อุปกรณ์แสดงผล หน้าจอ ไฟแสดงสถานะ หรืออื่นๆ เป็นส่วนที่ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ และวัตถุประสงค์การนำไปใช้งาน อีกทั้งองค์ประกอบ เช่น ภาชนะยาสวนหน้า หรือวงจรภาชนะยาสวน ในบางเครื่องอาจไม่มีองค์ประกอบดังกล่าว เนื่องจากมีอยู่ในหัววัดแล้ว หรือมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดังกล่าวแล้ว โดยองค์ประกอบของเครื่อง MCA ชนิดพกพาโดยทั่วไป แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของเครื่อง MCA ชนิดพกพา

## การวิจัยและออกแบบสร้างเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง

จากการค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับการสร้างเครื่อง MCA โดยนักวิทยาศาสตร์ และบริษัทผู้ผลิตพบว่า มีผู้ศึกษาวิจัย และพัฒนาเครื่อง MCA สำหรับใช้ในงานตรวจวัดรังสีที่หลากหลายรูปแบบ ดังนี้

Cardoso *et al.* (2006) ได้วิจัย และออกแบบเครื่อง MCA ชนิดพกพา โดยเครื่อง MCA ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F87X แบบ 8 บิต เป็นหน่วยประมวลผล โดยเครื่องที่พัฒนาขึ้นมีหน่วยความจำภายในเครื่อง ทำให้เกิดข้อเสียคือไม่สามารถเพิ่มความจุของหน่วยความจำได้ ส่วนการแสดงผลสามารถแสดงผลผ่านทางอุปกรณ์สร้างภาพ (dot-matrix graphic) และยังสามารถนำมาเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางยูเอสบีพอร์ต และพอร์ต RS-232 ด้านแหล่งพลังงานที่จ่ายให้กับวงจรได้ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นแหล่งพลังงาน นอกจากนี้ Cardoso ที่ทำการออกแบบวงจรโดยมีหน่วยประมวลผลเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ PIC แล้ว Fazzi *et al.* (2001) ได้ทำการออกแบบวงจรเครื่อง MCA ชนิดพกพาขึ้น เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ไอโซโทปที่ผสมกัน 2 ไอโซโทปสำหรับใช้งานทางการแพทย์ในการรักษาโรคมะเร็งรังสี โดยเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ออกแบบ มีจำนวนช่องเท่ากับ 1024 ช่อง ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 17C756 เป็นหน่วยประมวลผล และมีวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบ 10 บิต อยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ ในส่วนของหน่วยความจำได้ใช้หน่วยความจำแบบ SRAM ที่ออกแบบให้ ติดอยู่กับแผงวงจร โดยมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงาน ส่วนของการควบคุมการทำงานของเครื่องนั้นสามารถทำได้โดยการตั้งการทำงานจากคอมพิวเตอร์ผ่านไปยังเครื่อง MCA ชนิดพกพา

นอกจากการนำไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส PIC มาใช้ในการออกแบบแล้วยังสามารถนำไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอื่นมาใช้ได้ เช่น งานวิจัยของ Khan and Shahid (1987) ได้ทำการสร้างเครื่อง MCA ชนิดพกพาราคาถูกสำหรับใช้วัดพลังงานของรังสีแกมมา โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นหน่วยประมวลผลของบริษัท Intel รุ่น Intel 8751 ภายในเครื่องประกอบด้วยวงจรต่างๆ ได้แก่ แหล่งจ่ายความต่างศักย์สูง (high voltage power supply) และมีแบตเตอรี่ที่สามารถอัดประจุใหม่ได้ อยู่ใน

นอกจากการออกแบบในส่วนของวงจรที่ได้กล่าวมาตอนต้นแล้ว ยังมีการออกแบบหัววัดที่มีความเร็ว และใช้งานเฉพาะด้าน โดย Bello *et al.* (2001) ทำการออกแบบเครื่องตรวจวัดรังสีที่มีความเร็ว โดยใช้หัววัดรังสีประเภทสารกึ่งตัวนำ และใช้หน่วยความจำซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อให้รวดเร็วในการตรวจวัดรังสี และได้มีการพัฒนาการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อเพิ่มความเร็วยิ่งอีกด้วย

งานวิจัยข้างต้นเป็นการพัฒนาเครื่อง MCA โดยใช้วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่อยู่ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งต่างจากงานวิจัยของ Lima *et al.* (2004) ที่เน้นการพัฒนา

วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลโดยได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับ เครื่อง MCA ที่ใช้ติดตั้งบนแผงวงจรหลักของคอมพิวเตอร์ (main board) โดยพัฒนาวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบความเร็วสูง ซึ่งในงานวิจัยได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ มาแทนที่ไมโครโปรเซสเซอร์ โดยให้เหตุผลว่า เครื่อง MCA ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ มีความเรียบง่ายไม่ยุ่งยาก ในส่วนการพัฒนาวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลโดยใช้วงจรแปลงสัญญาณ 2 ตัว รหัส AD976ACN และ AD167KP แบบ 16 และ 12 บิต ตามลำดับโดยวงจรทั้งสองตัวนี้มีความแตกต่างกันคือ AD976ACN มีความสามารถแปลงสัญญาณได้สูงสุดถึง 200,000 จำนวนนับต่อวินาที และมีความเป็นเชิงเส้นสูง ส่วน AD1671KP ซึ่งมีคุณสมบัติแปลงสัญญาณแบบความถี่สูงได้ดีแต่มีความเป็นเชิงเส้นต่ำกว่า คือสามารถแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลได้สูงสุดที่ 125,000 จำนวนนับต่อวินาที โดยผลการทดลองพบว่า มีค่า dead time 200 นาโนวินาที และวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลสามารถทำงานได้เป็นเชิงเส้น

นอกจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาโดยนักวิจัยแล้วยังมีงานวิจัยที่พัฒนาจากบริษัทผลิตอุปกรณ์วัดรังสี เช่น บริษัท Tolvel บริษัท Canberra และบริษัท AMP TEK โดยบริษัท Tolvel (2006) ได้ออกแบบเครื่อง MCA ที่ใช้กับคอมพิวเตอร์ ซึ่งวงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลมีช่วงเวลาแปลงสัญญาณเท่ากับ 390 นาโนวินาที ส่วนบริษัท Canberra (2003) ได้ออกแบบเครื่อง MCA ที่ใช้กับหัววัดแบบ scintillation detectors รุ่น ASA-100 มีจำนวนช่องในการเก็บข้อมูล 1024 ช่อง ออกแบบให้ติดตั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านช่องทาง PCI นอกจากนี้ได้มีการออกแบบให้รองรับหัววัด NaI(Tl) ภายในประกอบด้วยวงจรแหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และมีหน่วยความจำติดตั้งอยู่ในแผงวงจรด้วย ส่วนบริษัท AMP TEK (2004) ได้ทำการผลิตเครื่อง MCA ชนิดพกพา โดยทางบริษัทเรียกว่า Pocket MCA มีช่วงเวลาในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลน้อยกว่า 5 ไมโครวินาที มีค่าต่ำสุดของ peaking time เท่ากับ 250 นาโนวินาที ในส่วนของการใช้งานสามารถเลือกรูปแบบได้ 2 แบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 First Peak After Threshold เป็นรูปแบบมาตรฐานที่ใช้ในงานเครื่องมือทางนิวเคลียร์ที่ทางบริษัทกำหนดมาให้ และรูปแบบที่ 2 Absolute Peak Above Threshold เป็นรูปแบบที่ใช้เมื่อต้องการตรวจวัดรังสีในอากาศ

จากการวิจัย และออกแบบสร้างเครื่อง MCA ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาเป็นส่วนควบคุม และประมวลผลมีข้อดีคือ สามารถลดขนาดของเครื่องได้จนสามารถสร้างเครื่อง MCA ชนิดพกพาได้ ซึ่งทำให้ประหยัดพลังงาน และใช้งานได้สะดวก

ยิ่งขึ้นแต่มีข้อจำกัดในส่วนบันทึกข้อมูลที่ออกแบบให้ติดอยู่บนแผงวงจรของเครื่องทำให้ไม่สามารถเพิ่มหน่วยความจำได้ ส่งผลให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลจำนวนมากได้

### ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในงานทางอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องมีการประมวลข้อมูล รวมทั้งควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ แม้งานเหล่านี้สามารถควบคุมด้วยมนุษย์ แต่ในทางปฏิบัติ พบว่า เมื่อระยะเวลาการทำงานติดต่อกันเป็นเวลานาน หรืออยู่ในสถานะที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการทำงาน จะส่งผลให้เกิดข้อจำกัดในการควบคุม และประมวลผล ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น หน่วยประมวลผลเข้ามาทำงานแทน โดยจากการศึกษาพบว่าหน่วยประมวลผลในงานอิเล็กทรอนิกส์แบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ

1. ไมโครโปรเซสเซอร์ คือ หน่วยประมวลผลที่เน้นออกแบบให้มีความซับซ้อนสูง มีคำสั่งการทำงาน (instruction) ที่ซับซ้อน และบรรจุชุดคำสั่งไว้มากมายเพื่อสะดวกในการทำงาน ซึ่งเป็นข้อดีของไมโครโปรเซสเซอร์ แต่ไมโครโปรเซสเซอร์ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลเพียงอย่างเดียว จึงไม่มีหน่วยความจำอยู่ภายในไม่ว่าจะเป็น หน่วยความจำแบบ แรม และรอม นอกจากนี้ยังไม่มีพอร์ต (Port) สัญญาณอยู่ภายใน เมื่อต้องนำไมโครโปรเซสเซอร์ไปใช้จึงจำเป็นต้องต่อหน่วยความจำ และพอร์ตสัญญาณภายนอก ตัวอย่างของไมโครโปรเซสเซอร์ ได้แก่ ไมโครโปรเซสเซอร์ของบริษัท Intel รหัส Pentium เป็นต้น

2. ไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ วงจรรวม (integrated circuit, IC) ที่มีการนำไมโครโปรเซสเซอร์ และอุปกรณ์พื้นฐานไว้ภายใน ได้แก่ หน่วยความจำแบบอ่านอย่างเดียว (read-only memory, ROM) หรือ พรอม (programmable read-only memory, PROM) หรืออีพรอม (erasable read-only memory, EPROM) หน่วยความจำแบบอ่าน และเขียน (random access memory, RAM) พอร์ตสัญญาณเข้า พอร์ตสัญญาณออกแบบขนาน ไทม์เมอร์ และพอร์ตสื่อสารอนุกรม

## ชนิดของไมโครคอนโทรลเลอร์

การจำแนกชนิดของไมโครคอนโทรลเลอร์มีการจำแนกไว้หลายประเภท เนื่องจากมีหลักการจำแนกที่แตกต่างกัน เช่น ความเร็ว ขนาดของหน่วยความจำ จำนวนขา และบริษัทผู้ผลิต เป็นต้น โดยในที่นี้ผู้วิจัยใช้หลักการทางสถาปัตยกรรมการออกแบบเป็นเกณฑ์จำแนกไมโครคอนโทรลเลอร์ออกเป็น 2 ประเภทดังนี้ (ธีรวัฒน์, 2541)

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์สถาปัตยกรรมแบบริส (reduced instruction set computer architecture, RISC architecture) เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีหลักการออกแบบคือ ลดความซับซ้อนในชุดคำสั่งการทำงานภายใน โดยมีแนวคิดที่ว่า ภายในหนึ่งรอบสัญญาณนาฬิกา ไมโครคอนโทรลเลอร์ควรประมวลผลให้เสร็จสิ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบให้ชุดคำสั่งภายในมีความกระชับและง่าย ตัวอย่างไมโครคอนโทรลเลอร์สถาปัตยกรรมแบบริส ได้แก่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัทไมโครชิพ (Microchip) รหัส PIC และไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัท แอทเมล (Atmel) รหัส AVR เป็นต้น

2. ไมโครคอนโทรลเลอร์สถาปัตยกรรมแบบซิส (complex instruction set computer architecture, CISC architecture) จะมีแนวคิดที่ตรงข้ามกับแบบริส คือ มีหลักการออกแบบชุดคำสั่งที่อยู่ภายในให้มีความซับซ้อน และหลากหลาย ชุดคำสั่งจะถูกออกแบบให้มีจำนวนมาก เพื่อการทำงานได้หลากหลาย มีคำสั่งการทำงานเฉลี่ย อยู่ที่ 100 สัญญาณนาฬิกาต่อ 1 คำสั่ง ซึ่งใช้สัญญาณนาฬิกามากกว่าสถาปัตยกรรมแบบริสที่ใช้เพียง 1 สัญญาณต่อ 1 คำสั่ง จุดเด่นของไมโครคอนโทรลเลอร์สถาปัตยกรรมแบบซิส คือ การเขียนโปรแกรมการทำงานที่ง่าย เนื่องจากมีชุดคำสั่งที่มาก และหลากหลายรองรับ ตัวอย่างไมโครคอนโทรลเลอร์สถาปัตยกรรมแบบซิสได้แก่ ไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส 805 ของบริษัทอินเทล (Intel) และไมโครคอนโทรลเลอร์ รหัส 68000 ของบริษัท โมโตโรลาร์ (Motorola) เป็นต้น

## ไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส PIC18F2525 PIC18F2620 และ PIC18F2680

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์หนึ่งตัว สามารถทำงานควบคู่กันได้เท่ากับคอมพิวเตอร์หนึ่งตัว ซึ่งเมื่อเทียบกับคอมพิวเตอร์แล้วพบว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์มีข้อดีที่ชัดเจน คือ มีราคาต่ำกว่ามาก ประหยัดพลังงาน และประหยัดพื้นที่ โดยเฉพาะไมโครคอนโทรลเลอร์สถาปัตยกรรมแบบรหัส จากข้อดีดังกล่าวทำให้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์สถาปัตยกรรมแบบรหัส รหัส PIC ของบริษัท Microchip เป็นส่วนประสมผลการทำงานร่วมกับเอสดีการ์ด เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าว มีโปรแกรมในการพัฒนาเกี่ยวกับการเชื่อมต่อกับเอสดีการ์ดทำให้สะดวก และรวดเร็วในการพัฒนา โดยในการทดลองได้เลือกรหัส PIC18F2525 PIC18F2620 และ PIC18F2680 ซึ่งมีความสามารถดังแสดงในตารางที่ 1 ทั้งนี้พบว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งสามรหัส มีความเหมาะสมเนื่องจากมีหน่วยความจำสำหรับโปรแกรมสูง และมีวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลอยู่ภายในแบบ 10 บิต แบบ 8 ช่อง และ 10 ช่อง มีความสามารถรองรับการสื่อสารแบบ SPI MODE ได้ อีกทั้งยังมีวงจรฐานเวลาแบบ 8 บิต และ 16 บิต (Microchip, 2004) ซึ่งทุกส่วนที่กล่าวมาข้างต้นคือ ส่วนประกอบหลักของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่จะพัฒนาขึ้นทั้งหมด ดังนั้นการนำไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งสามรหัสมาพัฒนาระบบบันทึกข้อมูลของเครื่อง MCA ชนิดพกพา จึงนับว่ามีประโยชน์ และช่วยลดการออกแบบวงจรลงได้

ตารางที่ 1 รหัสไมโครคอนโทรลเลอร์และคุณสมบัติ

Device	Program Memory		Data Memory		ADC (ch)	SPI
	Flash (bytes)	SRAM (bytes)	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)		
18F2525	48K	24576	3986	1024	10	Yes
18F2620	64K	32768	3986	1024	10	Yes
18F2680	64K	32768	3328	1024	8	Yes

ที่มา: Microchip (2004)

## วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

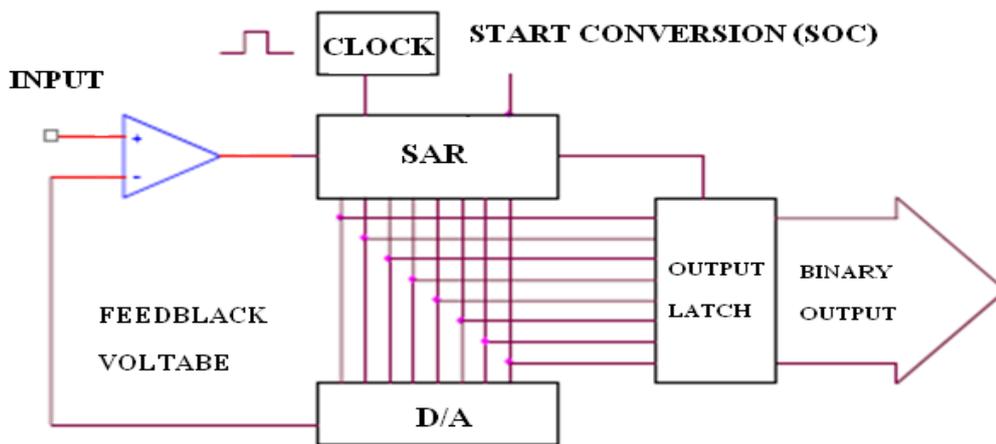
วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล เป็นส่วนที่มีความสำคัญส่วนหนึ่งในการออกแบบเครื่อง MCA เนื่องจาก สัญญาณที่ได้จากหัววัดรังสีเป็นสัญญาณแอนะล็อก จำเป็นต้องมีการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากในวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลักเล็งข้มไม่ได้ที่ต้องมีการเชื่อมโยงกันระหว่างสัญญาณแอนะล็อกและดิจิทัล เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณต่างๆ เช่น การตรวจจับสัญญาณแสง ความร้อน อุณหภูมิ หรือแม้กระทั่ง รังสี ต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับต่างๆ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ทำหน้าที่แปลงปริมาณทางฟิสิกส์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า กล่าวสั้นๆ คือ แปลงปริมาณทางฟิสิกส์เป็นแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น (นภัทร, 2545)

สัญญาณที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มี 2 ชนิด คือ สัญญาณแอนะล็อก และสัญญาณดิจิทัล สัญญาณแอนะล็อกจะใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ ไป และใช้ในการควบคุมแบบเก่า ในปัจจุบันมีไมโครคอนโทรลเลอร์ เข้ามาช่วยในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย ซึ่งทำให้การควบคุมนั้นทำได้ง่าย และรวดเร็วยิ่งขึ้น แต่ในการควบคุมจำเป็นต้องใช้สัญญาณดิจิทัลในการติดต่อกับไมโครโปรเซสเซอร์ หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องมีการเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลก่อนนำสัญญาณนั้นเข้ามาสู่ไมโครโปรเซสเซอร์ หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้ควบคุมระบบต่อไป การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล วงจรจะแปลงสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นเลขฐานสอง ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของตัวเลขเทคนิคการแปลงสัญญาณของ ADC มีหลายแบบได้แก่ การแปลงสัญญาณแบบแฟลช การแปลงสัญญาณแบบความชันเดี่ยว การแปลงสัญญาณแบบความชันคู่ การแปลงสัญญาณแบบป้อนกลับ และการแปลงสัญญาณแบบประมาณค่าหลายครั้ง ซึ่งแต่ละแบบก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป แต่ในที่นี้ขออธิบายการแปลงสัญญาณแบบประมาณค่าหลายครั้ง เนื่องจาก ADC ที่อยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีการแปลงแบบประมาณค่าหลายครั้ง

### การแปลงสัญญาณแบบประมาณค่าหลายครั้ง

เทคนิคแบบการประมาณค่าหลายครั้ง (Successive Approximation Converter) มีชื่อย่อว่า SA เป็นวิธีการที่ผู้ผลิตนิยมใช้เนื่องจากมีราคาถูก มีความละเอียดอยู่ในระดับดี รวมทั้งมีความเร็วสูงในการแปลงสัญญาณ และมีประสิทธิภาพสูงเพราะไม่เกิดการออสซิลเลต

หลักสำคัญของการประมาณค่าหลายครั้ง คือ อุปกรณ์ที่เรียกว่า Successive Approximation Register (SAR) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีจุดประสงค์ต่างจากวงจรนับทั่วไปดังภาพที่ 3 การทำงานเริ่มต้นเมื่อสัญญาณแอนะล็อกถูกป้อนให้กับตัววงจรแปลงสัญญาณ และถูกป้อนให้กับตัว SAR พัลส์สัญญาณนาฬิกาถูกแรกที่ป้อนให้กับตัว SAR จะเปิดเอาต์พุตของบิตนับสูงสุด ดังนั้นจึงเป็นการปรับให้เอาต์พุตของ D/A เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ตัว SAR ตรวจสอบไปยังเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบว่า เอาต์พุตของ D/A มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าสัญญาณแอนะล็อกทางอินพุต ถ้าแรงดัน D/A มีค่ามากกว่าวงจรเปรียบเทียบจะยังคงสถานะไม่ทำงาน ดังนั้นตัว SAR จะยังคงให้บิตนัยสำคัญสูงสุดทำงานอยู่ เรียกสถานะนี้ว่า “ 1 ” ซึ่งสถานะ “ 0 ” หรือ “ 1 ” จะกระทำภายในพัลส์ของสัญญาณนาฬิกาเพียงลูกเดียว ในสัญญาณนาฬิกาถัดไป ตัว SAR จะให้บิตนัยสำคัญอันดับสองทำงาน และทำการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้อีกครั้งหนึ่งจากวงจรเปรียบเทียบ ถ้าสัญญาณจาก D/A ครั้งใหม่มีค่ามากกว่าแรงดันอินพุต เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบจะยังคงไม่มี ดังนั้นตัว SAR จะไม่ทำงานบิตนัยสำคัญสูงสุดอันดับสอง เรียกว่า “ 0 ” แต่ถ้าสัญญาณจาก D/A มีค่าน้อยกว่า วงจรเปรียบเทียบจะทำงาน และตัว SAR จะปล่อยให้บิตนัยสำคัญสูงสุดอันดับสองทำงาน โดยตัว SAR จะพิจารณาแต่ละบิตด้วยวิธีเดียวกันจนครบทุกบิต เนื่องจากหนึ่งบิตหาค่าได้ภายในหนึ่งพัลส์ ดังนั้น A/D ขนาด 8 บิต จึงใช้สัญญาณนาฬิกาเพียง 8 พัลส์ ก็สามารถแปลงได้จนครบ เมื่อบิตนัยสำคัญต่ำสุดถูกดำเนินการแล้ว ตัว SAR จะส่งสัญญาณการแปลง (End of Converter, EOC) ที่ได้ซึ่งเป็นเลขฐานสอง

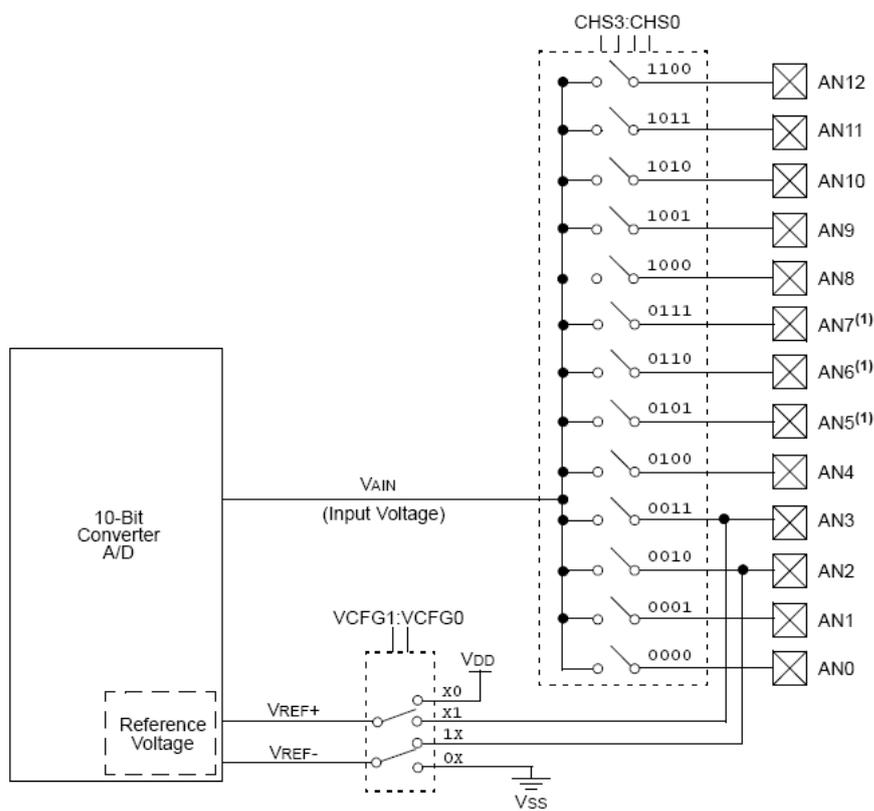


ภาพที่ 3 แผนผังการทำงานของ การแปลงแบบประมาณค่าหลายครั้ง

ที่มา: ปกรณ์ และปนัดดา (2551)

วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์  
 รหัส PIC18F2525 PIC18F2620 และ PIC18F2680

Microchip (2004) ซึ่งเป็นบริษัทที่ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F ได้อธิบายเกี่ยวกับวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลว่า ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส PIC18F2525 PIC18F2620 และ PIC18F2680 ได้รวมวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลชนิด successive approximation แบบ 10 บิตไว้ภายใน โดยการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดงแผนผังวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

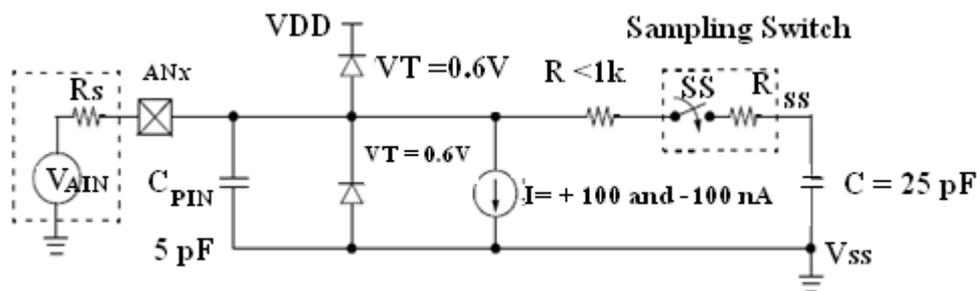
ที่มา: Microchip (2004)

โดยสามารถเลือกความต่างศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงที่ได้จากขั้นตอนการเขียนโปรแกรมในการทำงาน ซึ่งเลือกได้สองแหล่งคือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงทางบวก ที่ได้มาจาก V<sub>DD</sub> ขา และ

ความต่างศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงทางลบ ขา  $V_{SS}$  หรือระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขา RA3/AN3/ VREF+ และ RA2/AN2/ VREF-/CVREF ซึ่งแต่ละขาที่มีความเกี่ยวข้องกับวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลสามารถที่จะกำหนดโดยสัญญาณแอนะล็อกทางเข้าโดยมีรีจิสเตอร์ ADRESH และ ADRESL ที่อยู่ภายในวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล เมื่อวงจรแปลงสัญญาณเสร็จสมบูรณ์ ผลจากการแปลงจะถูกเก็บไว้ภายในรีจิสเตอร์ ADRESH:ADRESL โดยเริ่มที่รีจิสเตอร์ ADRESH สิ้นสุดที่ ADRES และรีจิสเตอร์ ADCON0 จะถูกล้างค่า

นอกจากเรื่องวิธีการทำงานของวงจรแล้ว ในงานตรวจวัดครั้งถัดไปจำเป็นต้องศึกษาเรื่องเวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลด้วย เนื่องจากมีผลกับเรื่องค่า dead time ของเครื่อง โดยระยะเวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F2525 PIC18F2620 และ PIC18F2680 สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 1 ถึงสมการที่ 3 โดย โครงสร้างภายในของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแสดงในภาพที่ 5

เมื่อเกิดการแปลงสัญญาณ หมายความว่าตัวเก็บประจุได้ส่งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้ตัวแปลงสัญญาณ เมื่อตัวแปลงสัญญาณได้รับค่าจากตัวเก็บประจุแล้ว วงจรจะทำการคงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้ไว้ในตัวเก็บประจุ  $C_{HOLD}$  ดังภาพที่ 5 จากนั้นจะปิดการเชื่อมต่อของขารับสัญญาณขาเข้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่อยู่ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส PIC 18F2620 โดยได้เลือกขาที่ 2 หรือ RA2 ของไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นขารับสัญญาณแอนะล็อก



ภาพที่ 5 แสดงส่วนประกอบภายในวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

ที่มา: Microchip (2004)

ตัวอย่างอย่างการคำนวณเวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส PIC18F2525 รหัส PIC18F2620 และ PIC18F2680 แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{TACQ} &= \text{Amplifier Settling Time} + \text{Holding Capacitor Charging Time} \\ &\quad + \text{Temperature Coefficient} \\ &= \text{TAMP} + \text{TC} + \text{TCOFF} \quad \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

สมการที่ 1 แสดงเวลาในการแปลงสัญญาณ ของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

โดย TACQ คือ เวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณ  
 TAMP คือ เวลาที่ตัวเก็บประจุใช้ในการอัดประจุสัญญาณทางเข้า  
 TCOFF คือ สัมประสิทธิ์เวลาที่ขึ้นกับอุณหภูมิ  
 TC คือ เวลาคงที่น้อยที่สุดในการอัดประจุของ ADC

เนื่องจากภายในมีตัวเก็บประจุขนาด 25 pF จึงสามารถคำนวณเวลาน้อยที่สุดในการอัดประจุของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลได้จากสมการที่ 2

$$\begin{aligned} \text{VHOLD} &= (\text{VREF} - (\text{VREF}/2048)) \times (1 - e^{-(\text{TC}/\text{CHOLD}(\text{RIC} + \text{RSS} + \text{RS}))}) \\ \text{TC} &= -(\text{CHOLD})(\text{RIC} + \text{RSS} + \text{RS}) \ln(1/2048) \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

แต่เพื่อความรวดเร็วในการคำนวณสามารถหาค่าเวลาน้อยที่สุดในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ได้โดยสมการที่ 3

$$\begin{aligned} \text{TACQ} &= \text{TAMP} + \text{TC} + \text{TCOFF} \quad \dots\dots\dots (3) \\ \text{TAMP} &= 0.2 \mu\text{s} \\ \text{TCOFF} &= (\text{Temp} - 25^\circ\text{C})(0.02 \mu\text{s}/^\circ\text{C}) \\ &= (85^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})(0.02 \mu\text{s}/^\circ\text{C}) \\ &= 1.2 \mu\text{s} \end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์เวลาที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (TCOFF) นำมาคำนวณเมื่ออุณหภูมิไม่เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส หากอยู่ระหว่าง 25 องศาเซลเซียส ค่า TCOFF = 0

$$\begin{aligned} TC &= -(CHOLD)(RIC + RSS + RS) \ln(1/2048) \\ &= -(25\text{pF})(1\text{k}\Omega + 2\text{k}\Omega + 2.5\text{k}\Omega) \ln(0.0004883) \\ &= 1.05 \mu\text{s} \end{aligned}$$

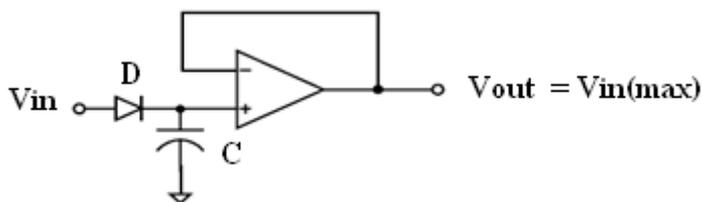
$$TACQ = 0.2 \mu\text{s} + 1 \mu\text{s} + 1.2 \mu\text{s}$$

$$TACQ = 2.4 \mu\text{s}$$

จากการคำนวณหาเวลาในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล พบว่า วงจร ADC ของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ใช้เวลาในการแปลงสัญญาณ 2.4 ไมโครวินาที

#### วงจรตรวจจับยอดพัลส์

การตรวจจับยอดพัลส์เป็นส่วนสำคัญในการทำงานของเครื่อง MCA เนื่องจากหลักการทำงานของเครื่อง MCA คือ การเก็บค่าความสูงพัลส์ในหน่วยเก็บที่เรียกว่าช่อง ตามที่ได้อธิบาย หลักการทำงานไว้ข้างต้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวเครื่อง MCA ในงานวิจัยนี้จึงนำวงจรตรวจจับยอดพัลส์ (Peak detector) เข้ามาทำงานในส่วนดังกล่าว ซึ่งมนตรี (2545) ได้อธิบายว่า วงจรตรวจจับยอดพัลส์ เป็นวงจรที่ใช้ตรวจจับ และคงค่าสูงสุดทางด้านบวกหรือด้านลบของสัญญาณอินพุต ในช่วงเวลาที่ต้องการได้ จนกว่าจะมีการรีเซ็ต (Reset) เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นศูนย์ วงจรนี้จึงเหมาะสำหรับใช้วัดค่าสูงสุดของสัญญาณอินพุต



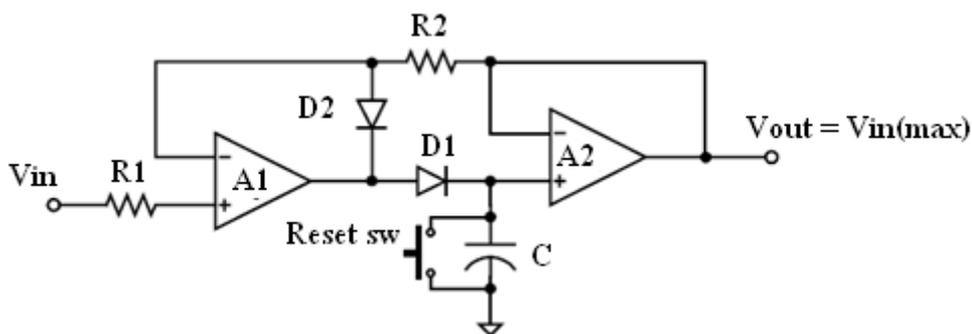
ภาพที่ 6 วงจรตรวจจับยอดพัลส์เบื้องต้น

ที่มา: มนตรี (2545)

วงจรในภาพที่ 6 เป็นวงจรตรวจจับค่าสูงสุดด้านบวก เมื่อมีสัญญาณอินพุต  $V_i$  เข้ามา ถ้าเป็นลบจะไม่สามารถผ่านไดโอด D ได้ แต่ถ้า  $V_i$  เป็นบวก จะมีกระแสไหลผ่านไดโอด ไปประจุที่ตัวเก็บประจุ C จนกระทั่งแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าสูงสุดของแรงดันอินพุต ( $V_{i\max}$ )

ถ้า  $V_i$  มีค่าต่ำกว่า  $V_{i\max}$  พบว่าไดโอดจะได้รับไบอัสกลับ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ จึงมีค่าที่ คงที่  $V_{i\max}$  เนื่องจากออปแอมป์ (Operation Amplifier, Op – Amp) มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงมาก และจากวงจรในภาพที่ 6 จะเห็นว่าออปแอมป์ก็ถูกต่อเป็นวงจรตามแรงดัน ดังนั้นวงจรจะส่งผ่านแรงดัน  $V_{i\max}$  นี้ออกไปที่เอาต์พุตนั่นคือ  $V_o = V_{i\max}$

ส่วนวงจรภาพที่ 7 เป็นการปรับปรุงวงจรตรวจจับค่าสูงสุด ด้วยการเพิ่มวงจรตามแรงดัน A1 เพื่อกันแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตออกจากตัวเก็บประจุ ในขณะที่ออปแอมป์ A2 ต่อเป็นวงจรตามแรงดัน เพื่อกันตัวเก็บประจุออกจากภาระ ดังนั้นวงจรตรวจจับค่าสูงสุดในภาพที่ 7 แรงดันไฟตรง  $V_o$  จะมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ



ภาพที่ 7 วงจรตรวจจับยอดพัลส์ที่มีการปรับปรุง

ที่มา: มนตรี (2545)

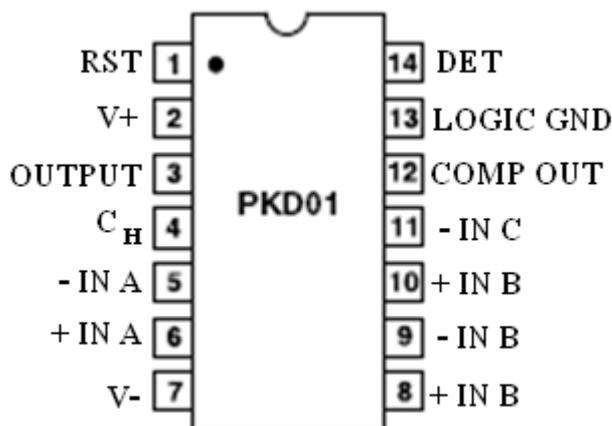
ถ้าหากแรงดันอินพุต เริ่มมีค่ามากกว่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุเก็บไว้ ตัวเก็บประจุก็จะทำการประจุแรงดันเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันถ้าแรงดันอินพุตลดลงต่ำกว่าระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุเก็บไว้ แรงดันเอาต์พุต  $V_o$  จะยังคงมีค่าเท่าเดิม เนื่องจากมีการกั้นระหว่างอินพุต ตัวเก็บประจุ และเอาต์พุต

ตัวต้านทาน  $R_1$  ควรกำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $R_2$  เพื่อลดผลของแรงดันอินพุตออฟเซตของ ออปแอมป์ และเนื่องจากออปแอมป์  $A_1$  ใช้ขั้วภาระที่เป็นตัวเก็บประจุ (Capacitive load) ดังนั้นจึง ควรเป็นออปแอมป์ที่มีการชดเชยความถี่ (Frequency Compensation) เช่น ออปแอมป์ 741 นอกจากนี้ ควรเลือกใช้ออปแอมป์ที่มีภาคอินพุตเป็นเฟ็ด เพื่อให้กระแสไหลเข้าออปแอมป์น้อย ที่สุด จะทำให้ตัวเก็บประจุค่าแรงดันไว้ได้นาน ส่วน Reset SW ที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ มีไว้ เพื่อใช้รีเซ็ตค่าแรงดันเอาต์พุตให้กลายเป็นศูนย์

### วงจรรวม PKD01

วงจรรวม PKD01 (Integrated circuit PKD01) ของบริษัท Analog devices เป็นอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่มีหน้าที่ และความสามารถหลายอย่าง คือ มีวงจรตรวจจับยอดพัลส์ (Peak detect) วงจรเปรียบเทียบ (Comparator) และวงจรคงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Peak hold)

ในงานวิจัยนี้ได้นำวงจรรวม PKD01 มาใช้เพื่อตรวจจับสัญญาณพัลส์สูงสุด และส่ง สัญญาณ ไปยังส่วนประมวลผลเพื่อให้ทำงานต่อไป เนื่องจากวงจรรวม PKD01 มีวงจรคงค่าความ ต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด และวงจรเปรียบเทียบอยู่ภายในซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการตรวจจับสัญญาณ พัลส์ ซึ่งวงจรรวม PKD01 มีตำแหน่งการจัดขา ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ตำแหน่งขาของวงจรรวม PKD01

ที่มา: Analog device (2001)

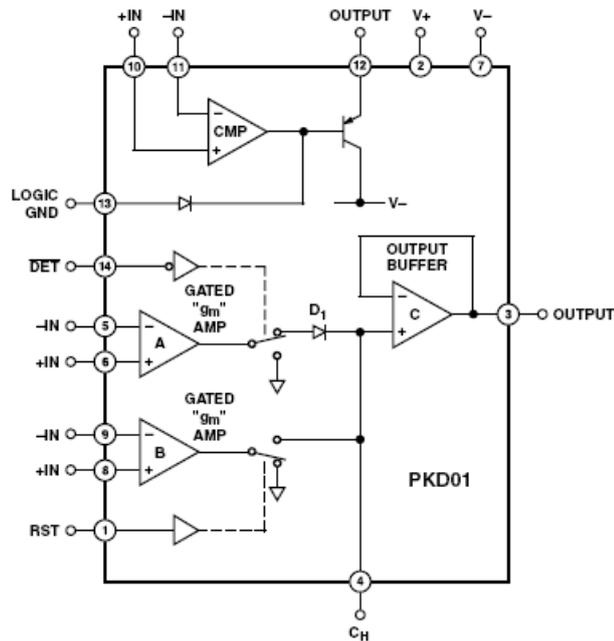
จากภาพที่ 8 เป็นการแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งการจัดขาของวงจรรวม PKD01 ซึ่งหน้าที่ของแต่ละขา แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 หน้าที่ของแต่ละขาของวงจรรวม PKD01

ชื่อ	ขาสัญญาณ	I/O	หน้าที่
RST	1	I	ควบคุมหน้าที่ของวงจรรวม PKD01
V+	2	I	ขาความต่างศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงด้านสูง
OUTPUT	3	O	สัญญาณทางออก
$C_H$	4		ขาต่อกับตัวเก็บประจุ
- IN A	5	I	อินพุตด้านลบของออปแอมป์ A
+IN A	6	I	อินพุตด้านบวกของออปแอมป์ A
V-	7		ขาความต่างศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงด้านต่ำ
+IN B	8	I	อินพุตด้านบวกของออปแอมป์ B
- IN B	9	I	อินพุตด้านลบของออปแอมป์ B
+IN C	10	I	อินพุตด้านบวกของออปแอมป์ C
- IN C	11	I	อินพุตด้านลบของออปแอมป์ C
COMP OUT	12	O	เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบ
LOGIC GND	13		กราวด์
DET	14	I	ควบคุมหน้าที่ของวงจรรวม PKD01

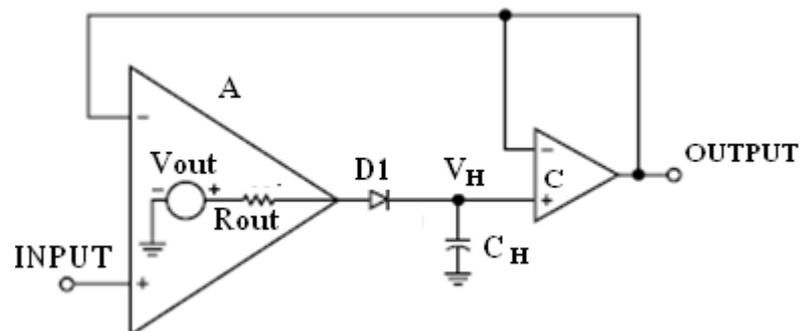
ที่มา: Analog device (2001)

วงจรรวม PKD01 จะใช้ออปแอมป์ อยู่ภายใน 4 ตัว โดยออปแอมป์ที่สำคัญคือ ออปแอมป์ A ออปแอมป์ B ออปแอมป์ C และ ออปแอมป์ CMP ดังภาพที่ 9 โดยออปแอมป์ A และออปแอมป์ C ถูกจัดให้เป็นวงจรตรวจจับสัญญาณสูงสุด แสดงดังภาพที่ 9 ดังนั้นหากต้องการให้วงจรตรวจจับค่าสูงสุดที่อยู่ภายในวงจรรวม PKD01 ทำงาน ต้องป้อนสัญญาณเข้าที่ขาของออปแอมป์ A โดยหากต้องการให้เป็นวงจรตรวจจับค่าสูงสุดด้านบวก ต้องป้อนที่ขา +IN A หากต้องการให้เป็นวงจรตรวจจับค่าสูงสุดด้านลบ ต้องป้อนสัญญาณเข้าที่ขา - IN A และจากภาพที่ 10 จะพบว่า มีตัวเก็บประจุ  $C_H$  ต่อที่ขา 4 อยู่ด้วย ซึ่งทำหน้าที่เก็บประจุที่ได้จากออปแอมป์ A



ภาพที่ 9 แสดงวงจรภายในของวงจรรวม PKD01

ที่มา: Analog device (2001)



ภาพที่ 10 วงจรตรวจจับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดภายในวงจรรวม PKD01

ที่มา: Analog device (2001)

เนื่องจากวงจรรวม PKD01 มีแบบการทำงานหลายแบบ ดังนั้นในการใช้งานจึงจำเป็นต้องเลือกแบบการทำงานของวงจรรวม PKD01 ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รูปแบบการทำงานของวงจรรวม PKD01

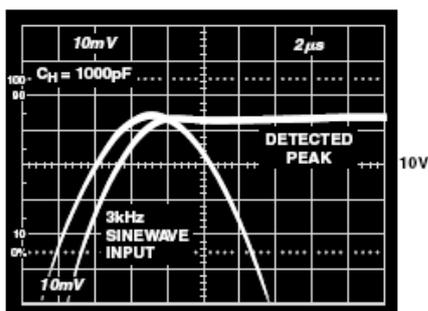
RST	DET	OPERATIONAL MODE
0	0	PEAK DETECT
0	1	PEAK HOLD
1	1	RESET
1	0	INDETERMINATE

ที่มา: Analog device (2001)

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นการทำงานของวงจรรวม ซึ่งสามารถเลือกได้โดยการป้อนสัญญาณลอจิกสูง หรือต่ำไปยังขาควบคุมคือ ขา RST และ DET

#### การทำงานแบบ PEAK DETECT ของวงจรรวม PKD01

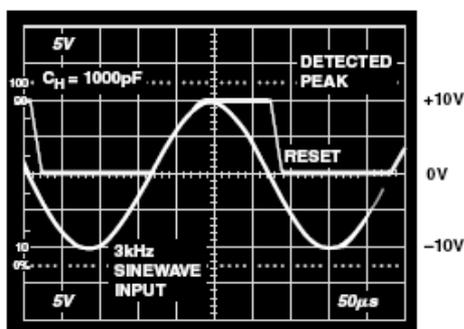
การเลือกแบบการทำงานในรูปแบบ PEAK DETECT สามารถทำได้โดยการต่อตัวเก็บประจุ  $C_H$  ที่ขาที่ 4 ของวงจรรวม และทำการส่งสัญญาณลอจิกต่ำไปยังขา RST และขา DET จากนั้นจึงป้อนสัญญาณทางเข้า ไปยังขา + IN A เมื่อต้องการให้เป็นวงจรตรวจจับค่าสูงสุดด้านบวก หรือ - IN A ให้เป็นวงจรตรวจจับค่าสูงสุดด้านลบ ซึ่งค่าที่ได้แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แสดงอินพุตและเอาต์พุตในแบบการทำงาน PEAK DETECT ของวงจรรวม PKD01

ที่มา: Analog device (2001)

จากภาพที่ 11 เส้นกราฟ แบบ SINEWAVE ด้านบนคือ สัญญาณอินพุตที่มีความถี่ 3 kHz ส่วน เส้นกราฟ DETECTED PEAK คือสัญญาณเอาต์พุต โดยใช้ตัวเก็บประจุ  $C_H$  1000 pF พบว่า สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะคงที่อยู่ที่จุดยอดพัลส์ของสัญญาณอินพุต เนื่องจากการทำงานแบบ PEAK DETECT ดังนั้นหากต้องการวัดสัญญาณอินพุตสัญญาณต่อมา จำเป็นต้องลบค่าเก่าออกก่อน (RESET) ด้วยการส่งสัญญาณควบคุมไปยังวงจรรวม PKD01 ดังนี้ คือ ส่งสัญญาณลอจิกสูงไปที่ขา RST และขา DET เป็นเวลาระยะหนึ่งแล้วจึงส่งสัญญาณลอจิกต่ำไปยังขา RST และขา DET เพื่อให้กลับเป็นแบบการทำงาน PEAK DETECT อีกครั้ง ซึ่งจากตัวอย่างใช้เวลาลบค่า 150  $\mu$ s ดังแสดงใน ภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แสดงอินพุตและเอาต์พุตในแบบการทำงาน PEAK DETECT ที่ใช้เวลา RESET 150  $\mu$ s ของวงจรรวม PKD01 (เส้นกราฟ แบบ SINEWAVE คือสัญญาณอินพุตที่มีความถี่ 3 kHz ส่วนเส้นกราฟ DETECTED PEAK คือสัญญาณเอาต์พุต)

ที่มา: Analog device (2001)

### เอสดีการ์ด

ปัจจุบันเอสดีการ์ดเป็นหน่วยความจำที่มีความโดดเด่น ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ ในวงการอุปกรณ์ที่เป็นหน่วยความจำไม่ว่าจะเป็นการออกแบบรูปร่างที่มีขนาดเล็ก สามารถพกพา ไปใช้งานได้สะดวก มีระบบรักษาความปลอดภัยของข้อมูล มีความจุสูง รวมถึงขีดความสามารถในการอ่าน และเขียนข้อมูลที่มีอัตราเร็วสูง ซึ่งเหมาะกับการใช้งานด้าน มัลติมีเดีย เช่น เสียง ภาพ และอื่นๆ จากข้อดีดังกล่าวทำให้ปัจจุบันมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากที่สามารถรองรับการใช้งานร่วมกับเอสดีการ์ด เป็นจำนวนมาก

ลักษณะภายนอกของเอสดีการ์ดนั้น มีขนาดที่กำหนดไว้เป็นมาตรฐานคือ มีความกว้าง 24 มิลลิเมตร ความยาว 32 มิลลิเมตร และความหนา 2.1 มิลลิเมตร มีน้ำหนักประมาณ 2 กรัม และมีมุมตัดที่มุมบนขวามือ ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ลักษณะเอสดีการ์ด

ที่มา: อารัมภีร์ (2549)

เอสดีการ์ดมีความแตกต่างจาก เอ็มเอ็มซีการ์ด (MMC Card) คือ มีขนาดที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีข้อแตกต่างกันในเรื่องของจำนวนขาที่ใช้ต่อกับตัวอุปกรณ์ภายนอกกล่าวคือ เอ็มเอ็มซีการ์ด จะมีขาสัมผัสเพื่อต่อกับอุปกรณ์ภายนอกทั้งหมด 7 ขา แต่เอสดีการ์ดจะมีขาสัมผัสทั้งหมด 9 ขา จำนวนขาสัมผัสต่างๆ ประกอบด้วยขาที่ใช้ต่อกับแหล่งจ่ายไฟ VCC ขาสายดิน (VSS1 และ VSS2) และขาสัญญาณเพื่อใช้ติดต่อกับตัวอุปกรณ์อื่น คือ ขาข้อมูล (DATA) ขาสัญญาณนาฬิกา (CLOCK) ขาควบคุม (CMD/DI) และขาตรวจสอบสถานะการ์ด (RES/CS) แต่สำหรับเอสดีการ์ดนั้นมีการเพิ่มขาข้อมูลขึ้นสองขาคือ DATA1 และขา DATA2 ซึ่งจะทำให้มีความแตกต่างในด้านความเร็วในการสื่อสาร (อารัมภีร์, 2549) หากทำการเปรียบเทียบจะเห็นว่าเอสดีการ์ดมีความเร็วสูงสุดมากกว่าเอ็มเอ็มซีการ์ด 4 เท่า เนื่องจากมีขาสัญญาณมากกว่า 2 ขา ส่งผลให้มีการกำหนดวิธีการในการสื่อสารข้อมูลในลักษณะ 4 บิต โดยเอสดีการ์ด มีความเร็วในการสื่อสารประมาณ 10 Mb/Sec ส่วนเอ็มเอ็มซีการ์ด มีความเร็วเพียง 2.5 Mb/Sec

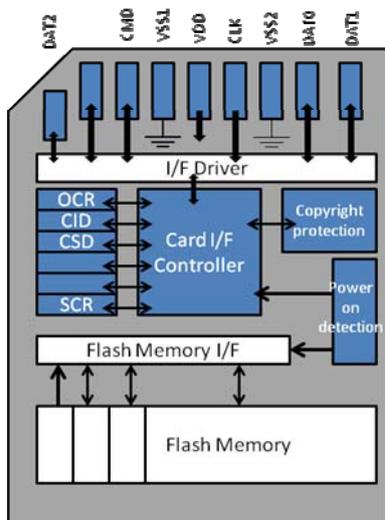
ความแตกต่างอีกอย่างสำหรับคุณสมบัติภายนอกที่เอ็มเอ็มซีการ์ดไม่มี แต่เอสดีการ์ดมี คือ ตำแหน่งด้านข้างทางซ้าย ดังภาพที่ 14 จะมีสวิตช์เลื่อน หากเลื่อนมายังตำแหน่ง Lock จะเป็นการไม่อนุญาตให้ทำการเขียนหรือลบข้อมูลบนตัวการ์ดได้ (Write Protect) แต่ถ้าหากเลื่อนสวิตช์มาที่ตำแหน่ง Un-Lock จะอนุญาตให้ทำการเขียนหรือลบข้อมูลบนตัวการ์ดได้ ซึ่งทั้งสองกรณีจะไม่รวมถึงการอ่านไม่ว่าตำแหน่งของสวิตช์จะอยู่สถานะ Lock หรือ Un-Lock ก็สามารถที่จะอ่านข้อมูลได้ตลอดเวลา



ภาพที่ 14 แสดงสวิตช์เลื่อนเอสดีการ์ด

ที่มา: Tarad (2007)

สำหรับบัสข้อมูลรวมถึงความต่างศักย์ไฟฟ้า ผู้ผลิตได้กำหนดไว้ในช่วง (Range) 2.7 โวลต์ ถึง 3.6 โวลต์ สำหรับกระแสจะใช้ประมาณ 10 มิลลิแอมแปร์ สำหรับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ หากใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเกินที่กำหนดจะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับเอสดีการ์ดได้



ภาพที่ 15 โครงสร้างภายในของเอสดีการ์ด

ที่มา: อาร์มเกีย (2549)

โครงสร้างภายในที่กำหนดการทำงานของการ์ด (ภาพที่ 15) ประกอบด้วยส่วนที่เป็น Copyright Protection และหน่วยควบคุมการทำงานที่มีการติดต่อกับพื้นที่ที่ใช้เก็บข้อมูล สำหรับพื้นที่ที่ใช้เก็บข้อมูลจะเป็นหน่วยความจำแบบแฟลช (Flash Memory) จะไม่มีการติดต่อโดยตรงกับ อินพุตหรือเอาต์พุต (I/O) ภายนอก กล่าวคือ จะต้องผ่านหน่วยควบคุมหลัก (Card Interface Controller) โดยในหน่วยควบคุมหลักนี้ยังมีการติดต่อกับรีจิสเตอร์เพื่อบ่งบอกสิ่งสำคัญต่างๆ ที่อยู่ในแผ่นการ์ดด้วย

#### รีจิสเตอร์ของเอสดีการ์ด

ในงานวิจัยนี้อธิบายตามตัวอย่างโครงสร้างมาตรฐานของเอสดีการ์ด เวอร์ชัน 1.01 ซึ่งมีการกำหนดตัวแปร (Register) หลัก 4 ตัว ซึ่งตัวแปรแต่ละตัวมีข้อมูลรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 1. ตัวแปร OCR (Operating Conditions Register)

รีจิสเตอร์บอกรายละเอียดของความต่างศักย์ไฟฟ้ามีขนาด 32 บิต โดยปกติแล้วเอสดีการ์ด จะมีการระบุช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage Range) ในการใช้งานดังตารางที่ 4

#### ตารางที่ 4 ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทำงาน

OCR Bit	VDD Voltage Window
0-3	Reserved
4	1.6-1.7
5	1.7-1.8
6	1.8-1.9
7	1.9-2.0
8	2.0-2.1
9	2.1-2.2
10	2.2-2.3
11	2.3-2.4
12	2.4-2.5
13	2.5-2.6
14	2.6-2.7
15	2.7-2.8
16	2.8-2.9
17	2.9-3.0
18	3.0-3.1
19	3.1-3.2
20	3.2-3.3
21	3.3-3.4
22	3.4-3.5
23	3.5-3.6
24-30	Reserved
31	Card power up status bit (busy)

ที่มา: อีทีที จำกัด (ม.ม.ป)

จากตารางที่ 4 แสดงตัวอย่างของตัวแปร OCR พบว่าหากบิตที่ 15 ถึงบิตที่ 23 มีค่าเป็น 1 จะส่งผลให้เอสดีการ์ดสามารถทำงานได้ที่ช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.4 ถึง 3.6 โวลต์ แต่หากอุปกรณ์หลักใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทำงานที่ 1.8 โวลต์ ต้องมีการเลือกใช้การ์ดให้เหมาะสมกับความ

ต่างศักย์ไฟฟ้า เพื่อป้องกันความเสียหายของตัวการ์ดเอง ซึ่งจุดนี้สามารถศึกษาได้จากคู่มือของการ์ดนั้นๆ

## 2. ตัวแปร CSD (Card Specific Data)

จากการศึกษาตัวแปร CSD พบว่าเป็นตัวแปรที่มีขนาด 128 บิต ซึ่งตัวแปรจะบอกสถานะความเร็วในการอ่านเขียนข้อมูลว่ามีเร็วมากเท่าใด นอกจากนี้ยังแสดงรูปแบบของไฟล์ FAT ว่ามีมาตรฐานรูปแบบใด เช่น มีลักษณะที่เป็น FAT16 หรือยังไม่มีการ Format เป็นต้น แต่ที่สำคัญคือจะมีบิตที่บอกว่ามีขนาดความจุเท่าใด ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก BLOCK\_LEN โดยจะอยู่ที่บิตที่ 80 ถึงบิตที่ 83 ส่วน C\_SIZE อยู่ที่บิต 63 ถึงบิตที่ 73 และ C\_SIZE\_MULT อยู่ที่บิตที่ 47 ถึงบิตที่ 49

เมื่อต้องการทราบขนาดของความจุต้องนำค่าที่อ่านได้จากบล็อก (BLOCK) ของรีจิสเตอร์มาคำนวณโดยสมการที่ 4

$$\text{Memory capacity} = (\text{BLOCK\_NR}) \times (\text{BLOCK\_LEN}) \quad \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4}$$

โดย BLOCK\_NR คือ จำนวนบล็อก

BLOCK\_LEN คือ ความยาวของแต่ละบล็อก

## 3. ตัวแปร CID (Card Identification Register)

เป็นตัวแปรที่อธิบายข้อมูลรายละเอียดของตัวเอสดีการ์ดเช่น ผู้ผลิต และหมายเลขประจำ (Serial Number) ขนาด 128 บิต หรือ 16 ไบต์ โดยยี่ห้อจะอยู่ตำแหน่งบิตที่ 64 ถึง 103 ซึ่งจะเป็นข้อมูลแอสกี (ASCII) สำหรับหมายเลขนั้นจะอยู่ตำแหน่งบิตที่ 24 ถึง 55 มีการจัดเก็บแบบ ไบนารี (binary) รวมถึงข้อมูลวัน/เดือน/ปี ที่ผลิต ซึ่งจะบ่งบอกในบิตที่ 8 ถึงบิตที่ 19 แสดงดังตารางที่ 5

## ตารางที่ 5 รายละเอียดของตัวแปร CID

Name	Type	Width	CID-Slice	Comment	CID Value
Manufacturer ID (MID)	Binary	8	[127:120]	The manufacturer IDs are controlled and assigned by the SD Card Association	0x03
OEM/Application ID (OID)	ASCII	16	[119:104]	Identifies the card OEM and/or the card controls. The OID is assigned by the 3C.	SD ASCII Code 0x53, 0x44
Product Name (PNM)	ASCII	40	[103:64]	5 ASCII characters long	SD128, SD064, SD032, SD16, SD008
Product Revision (PRV)	BCD	8	[63:56]	Two binary coded decimal digits	Product Revision (30)
Serial Number (PSN)	Binary	32	[55:24]	32 Bit unsigned interger	Product Serial Number
Reserved		12	[19:8]	Manufacture date-yyymm (offset form 2000)	Manufacture date (for example : Apr 2001=0x014)
CRC7 checksum (CRC)	Binary	7	[7:1]	Calculated	CRC7
Not used, always '1'		1	[0:0]		

**ที่มา:** อีทีที จำกัด (ม.ม.ป)

#### 4. ตัวแปร SCR (SD Card Configuration Register)

นอกจากตัวแปร CSD แล้วยังมีตัวแปรที่บอกเกี่ยวกับคุณสมบัติของการ์ดอีกตัวหนึ่ง คือ ตัวแปร SCR ซึ่งมีความยาวขนาด 64 บิต โดยข้อมูลที่บอกนี้ จะเป็นข้อมูลเกี่ยวกับมาตรฐานรุ่น (Standard Version)

SCR\_STRUCTURE และ SD \_SPEC จะบอกคุณสมบัติของการ์ดเอสดีด้าน มาตรฐานเวอร์ชันดังนั้นจึงสามารถตรวจสอบมาตรฐานเวอร์ชันได้จากส่วนนี้

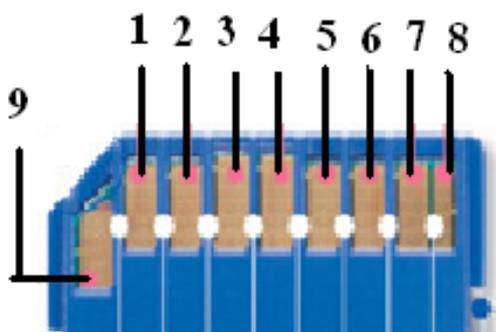
DATA\_STST\_AFTER\_ERASE ใช้กำหนดสถานะของข้อมูลหลังจากทำการลบข้อมูลในการ์ด

SD\_SECURITY อ้างถึงความปลอดภัยที่ใช้สำหรับการ์ด ซึ่งจะแบ่งออกตามเวอร์ชันของการ์ด

SD\_BUS\_WIDTH คือรีจิสเตอร์ที่บ่งบอกว่าการ์ด SD นี้มีการใช้บัสข้อมูล (Data Bus) จำนวนบิตเท่าใด

นอกเหนือจากนี้ เอสดีการ์ดยังใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำเพียง 2.7 โวลต์ ถึง 3.3 โวลต์ เมื่อเทียบกับหน่วยความจำประเภทอื่นที่ส่วนใหญ่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ ซึ่งช่วยในเรื่องการประหยัดพลังงานได้มากหากนำมาใช้ร่วมกับอุปกรณ์ที่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่

เอสดีการ์ดมีส่วนที่เป็นหน้าสัมผัสโลหะ หรือที่เรียกว่า ขา ทั้งหมด 9 ขา ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างตัวเอสดีการ์ด กับอุปกรณ์อื่น โดยลักษณะขาได้แสดงตามภาพที่ 16 ซึ่งแต่ละขาทำหน้าที่แตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 6



ภาพที่ 16 แสดงขาของเอสดีการ์ด

ที่มา: อาร์มเก็ช (2549)

ตารางที่ 6 ชื่อเรียกและหน้าที่ของแต่ละขาของเอสดีการ์ด

ขา	ชื่อเรียก	หน้าที่
1	CD/DAT3/CS	Card detection
2	CMD	Command
3	VSS	Ground
4	VDD	Power Supply
5	CLK	Clock
6	VSS	Ground
7	DAT0	Data I/O
8	DAT1	Data I/O
9	DAT2	Data I/O

ที่มา: อาร์มิกซ์ (2549)

### การติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับเอสดีการ์ด

เอสดีการ์ดสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ได้หลากหลายชนิด เช่น กล้องถ่ายรูป โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์ นอกจากอุปกรณ์ที่ได้กล่าวมาแล้วไมโครคอนโทรลเลอร์ ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้ร่วมกับเอสดีการ์ด เนื่องจากข้อดีของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้กล่าวข้างต้น ซึ่งการเชื่อมต่อระหว่าง ไมโครคอนโทรลเลอร์ กับเอสดีการ์ดสามารถทำได้สองแบบ คือ การเชื่อมต่อแบบ SD MODE และแบบ SPI MODE ดังรายละเอียดตามตารางที่ 7 และ 8 (อิตีที จำกัด, ม.ป.ป) ซึ่งในแต่ละรูปแบบการทำงาน จะมีคำสั่งต่างๆ คือหากต้องการติดต่อกับการ์ดในรูปแบบ SPI ขาสัญญาณ CS (CS หรือ Chip Select ในบางแหล่งจะใช้ชื่อ SS หรือ Slave Select หรือ CD) จะต้องกำหนดให้มีลอจิกต่ำ (Logic Low) ไว้ตลอดเวลา และขาสัญญาณที่ต้องกำหนดให้ใช้งานด้วย คือขา SCLK (Serial Clock) MISO (Master-IN Slave-Out) และ MOSI (Master-Out Slave-In) การส่งข้อมูลนั้นจะมีการรับ และส่งข้อมูลระหว่างตัวอุปกรณ์หลัก (Host) กับการ์ดครั้งละ 1 บิต ข้อมูลในแต่ละบิตนั้นจะต้องมีการอ้างอิงสัญญาณนาฬิกาที่ขา SCLK ขึ้นมา 1 ลูกต่อข้อมูล 1 บิต (อาร์มิกซ์, 2549)

**ตารางที่ 7** รายละเอียดขาสัญญาณต่างๆ เมื่อใช้การเชื่อมแบบ SD MODE

Pin	Name	Type	Description
1	CD/DAT3	I/O	Card detect/Data line [Bit3]
2	CMD	I/O	Command/ Response
3	VSS1	G	Ground
4	VDD	S	Supply voltage
5	CLK	I	Clock
6	VSS2	G	Ground
7	DAT0	I/O	Data line [Bit0]
8	DAT1	I/O	Data line [Bit1]
9	DAT2	I/O	Data line [Bit2]

ที่มา: อีทีที จำกัด (ม.ม.ป)

**ตารางที่ 8** รายละเอียดขาสัญญาณต่างๆ เมื่อใช้การเชื่อมต่อแบบ SPI MODE

Pin	Name	Type	Description
1	CS	I	Chip select (active low)
2	Data In	I	Host-to-card Commands and Data
3	VSS1	G	Ground
4	VDD	S	Supply voltage
5	CLK	I	Clock
6	VSS2	G	Ground
7	Data Out	O	Card-to-host Data and Status
8	RSV	----	Reserved
9	RSV	----	Reserved

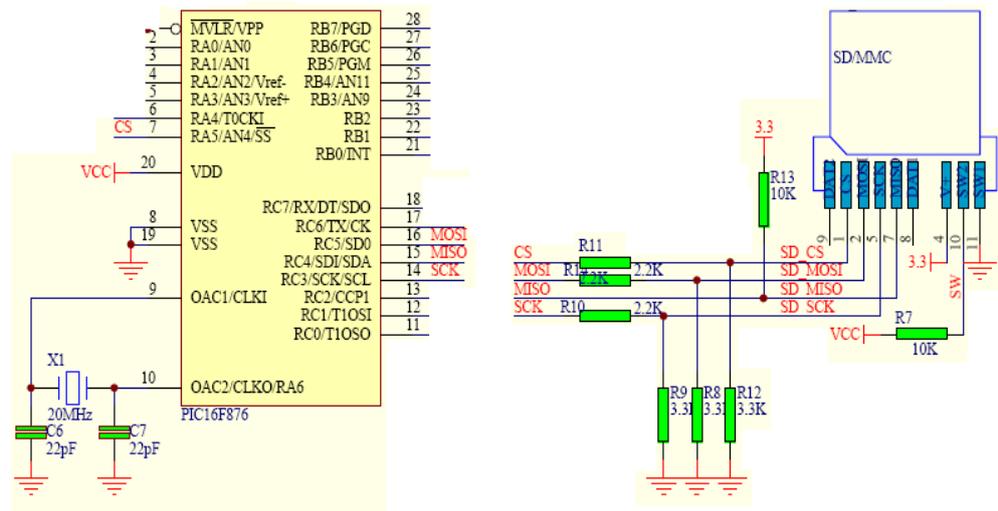
ที่มา: อีทีที จำกัด (ม.ม.ป)

สำหรับการติดต่อแบบเอสดีโหมด ขาที่เคยทำหน้าที่เป็นขา CS ใน SPI โหมด จะทำหน้าที่เป็นขา Card Detect และเมื่อมีการกำหนดการติดต่อกันในเอสดีโหมด แล้วจะมีขาที่ทำหน้าที่เป็นขา

ข้อมูล (Data) ทั้งหมด 4 ขา เพราะฉะนั้นจะได้ความเร็วในการสื่อสารมากเป็น 4 เท่าเมื่อเทียบกับ SPI

งานวิจัยนี้จะขอกว่าถึงการเชื่อมต่อแบบ SPI MODE ระหว่างเอสดีการ์ดกับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เท่านั้น เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้การเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ กับเอสดีการ์ดแบบ SPI MODE เนื่องจากง่าย ไม่ซับซ้อน และมีข้อมูลในการศึกษามาก

อาร์มิกย์ (2549) ได้ศึกษาอธิบายการติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ กับเอสดีการ์ดไว้ ดังภาพที่ 17

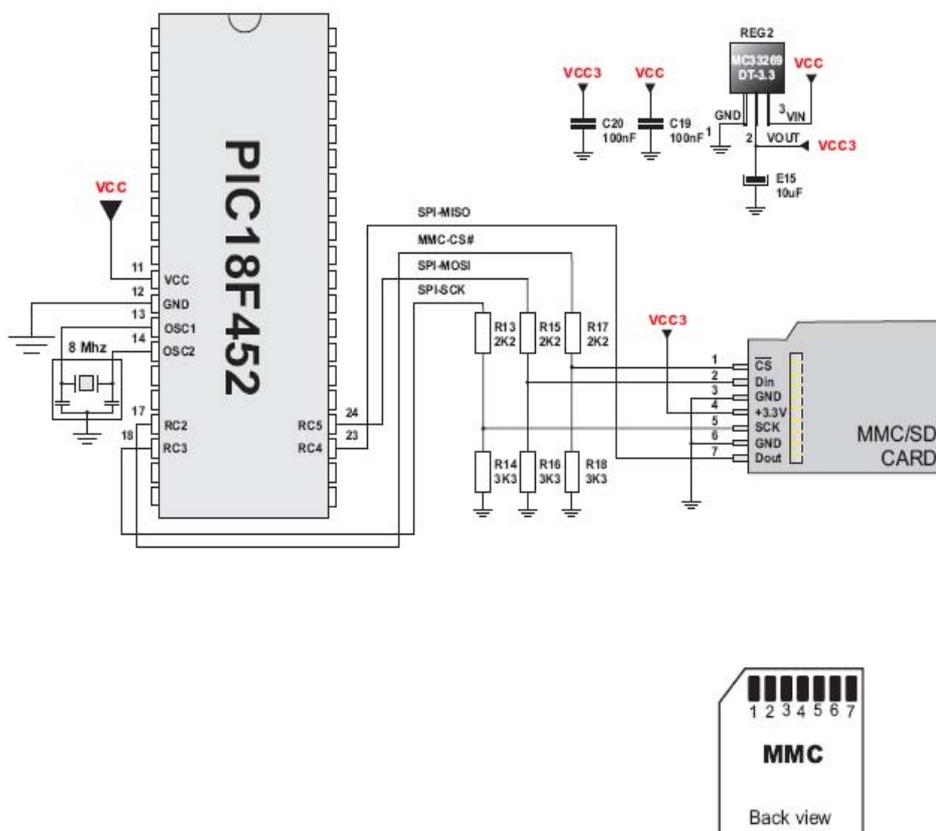


ภาพที่ 17 การติดต่อแบบ SPI MODE ของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F876 กับเอสดีการ์ด

ที่มา: อาร์มิกย์ (2549)

จากการศึกษาพบว่าไมโครคอนโทรลเลอร์เชื่อมต่อกับเอสดีการ์ดดังภาพ คือ ขาที่ 7 ของ ไมโครคอนโทรลเลอร์เชื่อมกับ ขา CS ของเอสดีการ์ด ทำหน้าที่ส่งคำสั่งควบคุม เริ่มต้น และยกเลิกการติดต่อระหว่างเอสดีการ์ดกับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยขา RC4 ทำหน้าที่รับข้อมูลจากการ์ดเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนขาที่ 16 ทำหน้าที่ส่งข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อเขียนลงสู่เอสดีการ์ด

จากตัวอย่างเป็นการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F876 กับเอสดีการ์ด ซึ่งการติดต่อสามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจร และการเขียนโปรแกรมให้เข้ากันได้ของผู้วิจัย อีกทั้งขึ้นอยู่กัไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละตัว และแต่ละบริษัทดังที่บริษัท Mikroelektronika (2006) ได้นำเสนอการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F452 กับเอสดีการ์ด และเอ็มเอ็มซีการ์ด ดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับเอสดีการ์ด และเอ็มเอ็มซีการ์ดแบบ SPI MODE

ที่มา: Mikroelektronika (2006)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulser) บริษัท Canberra รุ่น 807
2. โมดูลขยายสัญญาณพัลส์ (Amplifier) บริษัท Canberra รุ่น 2022
3. ไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส PIC 18F2525 PIC18F2620 และ PIC18F2680 ของบริษัท

### ไมโครชิป

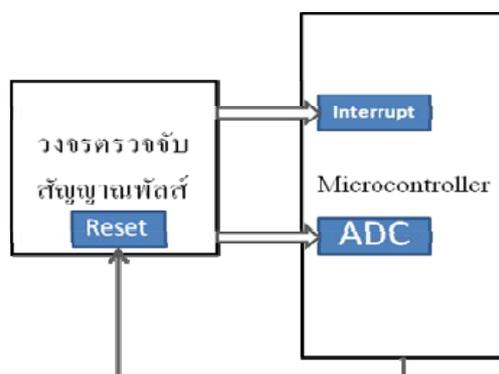
4. หัววัดรังสีชนิดซิลิคอนทิลเลชันผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) ยี่ห้อ Ortec รุ่น 905-1
5. หลอดทวิคูณแสง ยี่ห้อ Ortec รุ่น 276
6. ชุด MCA รุ่น TRUMP ของบริษัท ORTEC
7. หม้อแปลงไฟฟ้าให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าทางออก บวก 9 โวลต์ และลบ 9 โวลต์
8. ต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 ความแรง 10  $\mu\text{Ci}$
9. เอสดีการ์ด ความจุ 512 MB ของบริษัท Kingston
10. ออสซิลอสโคป
11. มัลติมิเตอร์
12. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
13. หัวแร้ง
14. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ
15. วงจรรวมเบอร์ PKD01 ของบริษัท Analog device

## วิธีการ

### 1. ศึกษาออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์

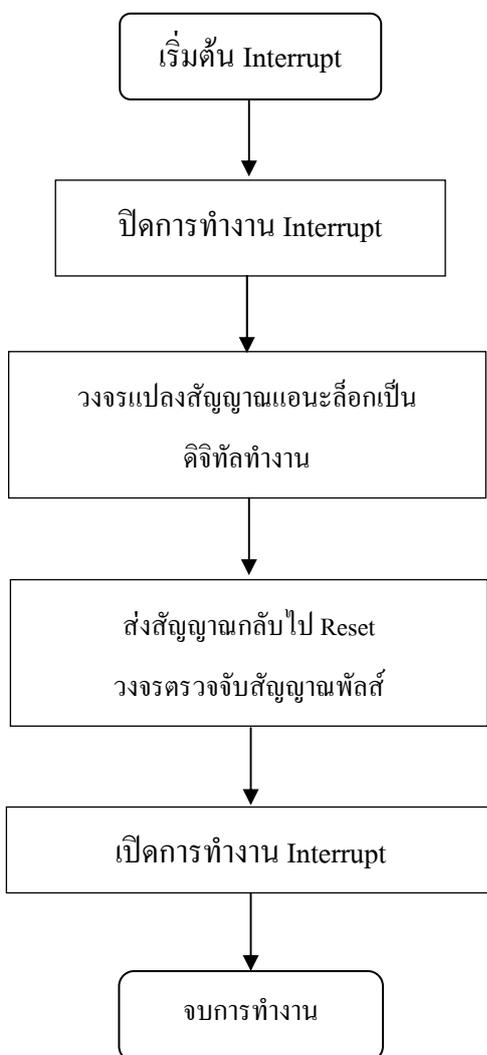
#### 1.1 ออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์

การออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ เริ่มจากนำวงจรรวม PKD01 ที่ประกอบด้วย วงจรพื้นฐานคือ วงจรตรวจจับค่าสูงสุด (Peak detector) และวงจรเปรียบเทียบ (Comparator) อยู่ภายในต่อลงบนบอร์ดทดลองร่วมกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบเช่น ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน ตามที่ได้ศึกษาไว้เป็นต้น จากนั้นต่อไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ากับวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ที่ ออกแบบเพื่อควบคุมการทำงานของวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ โดยต่อสายสัญญาณตรวจจับขอดี พัลส์ทางเข้าจากวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์กับขารับสัญญาณ Interrupt ของไมโครคอนโทรลเลอร์ และต่อสายสัญญาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขอดีพัลส์ กับขา ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังภาพที่ 19 จากนั้นต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าบวก 9 โวลต์ และลบ 9 โวลต์ โดย ต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าทางบวกเข้ากับ IC รหัส L7805 เพื่อลดความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เหลือ 5 โวลต์ จ่ายให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ และ IC LM1117 3.3 เพื่อลดความต่างศักย์ไฟฟ้าลงเหลือ 3.3 โวลต์ จ่ายให้กับ เอสดีการ์ด ด้านวงจรรวม PKD01 เป็นวงจรรวมที่ต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าทั้ง ทางบวก และลบดังนั้น จึงต้องจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าจากหม้อแปลงโดยตรง คือ บวก 9 โวลต์ และลบ 9 โวลต์



ภาพที่ 19 การต่อวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์

เมื่อต่อวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์เข้ากับ ไมโครคอนโทรลเลอร์แล้ว จำเป็นต้องเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน โดยมีผังการทำงานดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ผังการทำงานของโปรแกรมทดสอบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์

จากผังการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

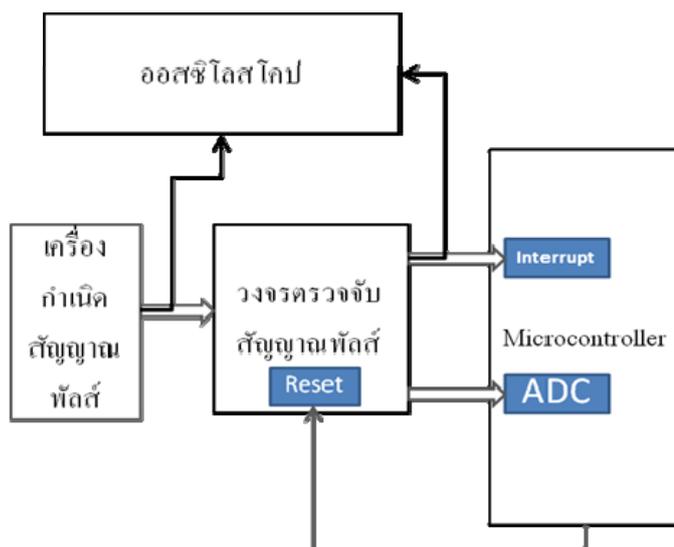
เมื่อวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ตรวจพบยอดพัลส์ จะส่งสัญญาณให้กับขา Interrupt ของไมโครคอนโทรลเลอร์ทราบ ส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เริ่มทำงานโดยการปิดการ Interrupt

เพื่อป้องกันการส่งสัญญาณซ้ำซ้อน จากนั้นวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายใน ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่าพัลส์ที่วงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์คงค่าไว้มาแปลงเป็นดิจิทัล เมื่อแปลงสัญญาณเสร็จ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณเพื่อเริ่มต้นการทำงานให้วงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ ขั้นตอนสุดท้าย คือไมโครคอนโทรลเลอร์จะเปิดการทำงาน Interrupt อีกครั้งเพื่อรับสัญญาณพัลส์สัญญาณต่อไป

## 1.2 ทดสอบการทำงานของวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์

### 1.2.1 ทดสอบการตรวจจับยอดพัลส์

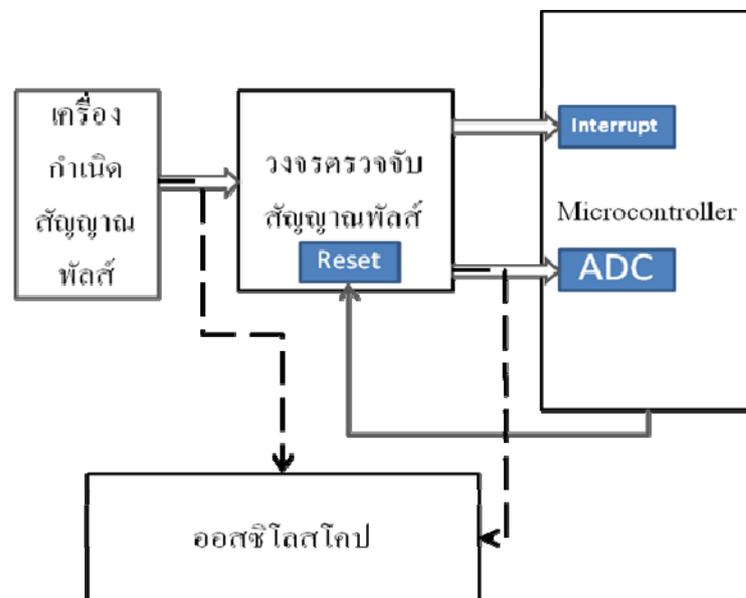
การทดสอบการตรวจจับยอดพัลส์ เริ่มจากการจำลองสัญญาณพัลส์ให้กับวงจร โดยเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์มาตรฐานของบริษัท Canberra รุ่น 807 ต่อเข้ากับวงจรที่ออกแบบ จากนั้นต่อสัญญาณที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์มาตรฐานเข้ากับออสซิลอสโคปเพื่อพิจารณาสัญญาณพัลส์ทางเข้า และต่อสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับยอดพัลส์ (สัญญาณส่งให้กับ ขา Interrupt ของไมโครคอนโทรลเลอร์) เข้ากับออสซิลอสโคป ดังภาพที่ 21 จากนั้นเริ่มต้นจ่ายพัลส์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.2 โวลต์ ความถี่ 50 รอบต่อวินาที และเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นครั้งละ 0.2 โวลต์ในการทดลองครั้งต่อไป จนถึง ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์



ภาพที่ 21 การต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์มาตรฐานเข้ากับวงจรที่ออกแบบเพื่อทดสอบการตรวจจับยอดพัลส์

### 1.2.2 ทดสอบการคงค่าขอดพัลส์

การทดสอบการคงค่าสัญญาณพัลส์สูงสุด เริ่มจากการจำลองสัญญาณพัลส์ให้กับวงจร โดยเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์มาตรฐานของบริษัท Canberra รุ่น 807 ต่อเข้ากับวงจรที่ออกแบบ และ ต่อแหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าความต่างศักย์ไฟฟ้า 9 โวลต์กับ IC รหัส L7805 เพื่อลดความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เหลือ 5 โวลต์ จ่ายให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ และ IC LM1117 3.3 เพื่อลดความต่างศักย์ไฟฟ้าลงเหลือ 3.3 โวลต์ จ่ายให้กับ เอสดีการ์ด และ บวก ลบ 9 โวลต์ จากหม้อแปลงไฟฟ้าให้กับวงจรรวม PKD01 เช่นเดียวกับการทดสอบการตรวจจับขอดพัลส์ จากนั้นต่อสัญญาณที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์มาตรฐานเข้ากับออสซิลโลสโคป และต่อสัญญาณที่ได้จากการคงค่าขอดพัลส์ (สัญญาณส่งให้กับ ขา ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์) เข้ากับออสซิลโลสโคป ดังภาพจากนั้นที่ 22 จากนั้นเริ่มต้นจ่ายพัลส์ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.2 โวลต์ ความถี่ 50 รอบต่อวินาที เพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นครั้งละ 0.2 โวลต์ในการทดลองครั้งต่อไป จนถึง ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์



ภาพที่ 22 การต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์มาตรฐานเข้ากับวงจรที่ออกแบบเพื่อทดสอบการคงค่าขอดพัลส์

## 2. ออกแบบวงจรระบบบันทึกข้อมูลของเครื่อง MCA ชนิดพกพา

### 2.1. ออกแบบวงจรติดต่อบetween ไมโครคอนโทรลเลอร์กับเอสดีการ์ด

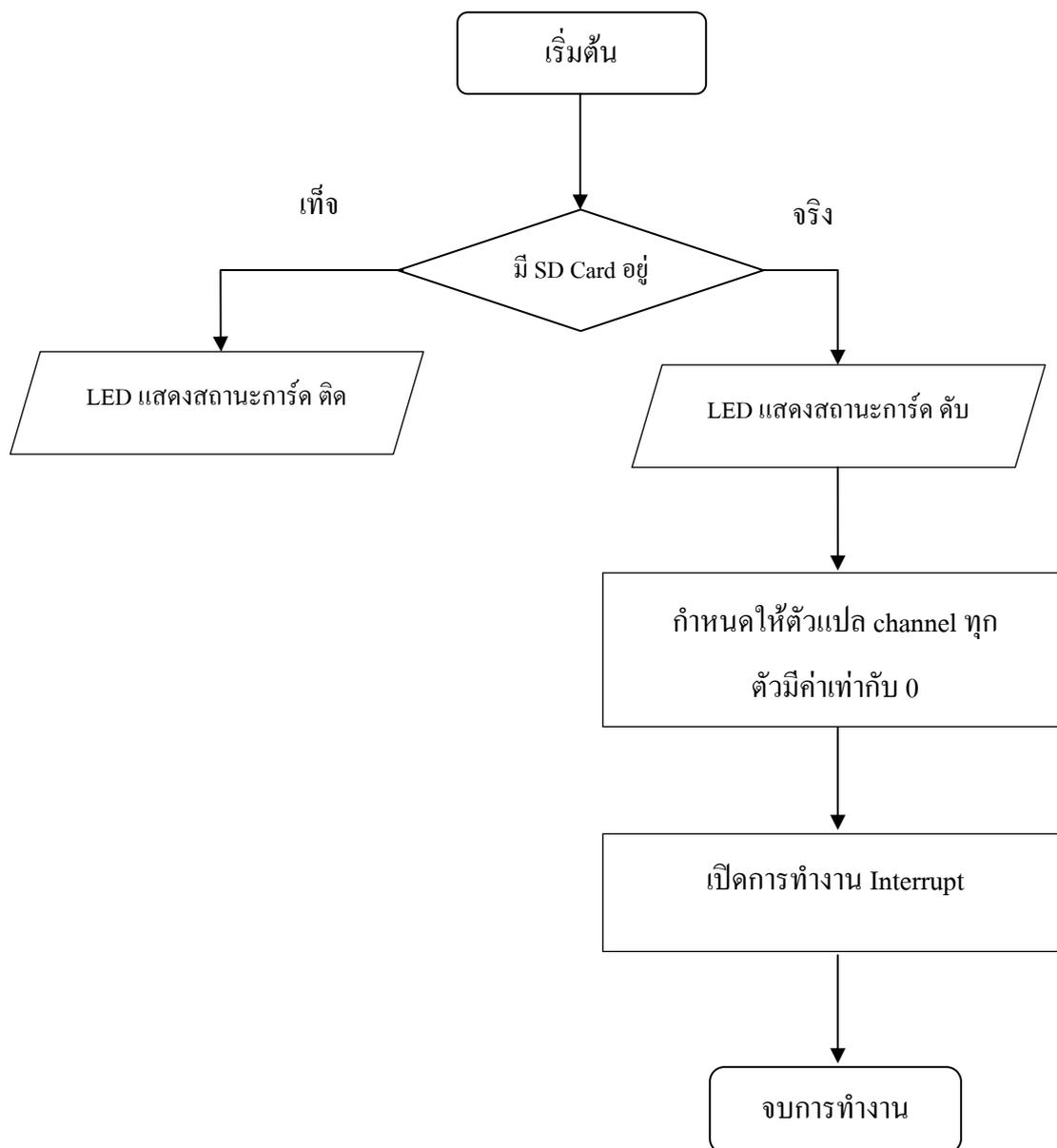
ออกแบบวงจรติดต่อบetween ไมโครคอนโทรลเลอร์กับเอสดีการ์ด โดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส PIC 18F2680 PIC 18F2525 และ PIC 18F2620 ต่อกับเอสดีการ์ดของบริษัท Kingston ความจุ 512 MB ในลักษณะต่างๆที่ได้จากการศึกษาและค้นคว้าข้อมูลมา จากนั้นต่อแหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าความต่างศักย์ไฟฟ้า 9 โวลต์กับ IC รหัส L7805 เพื่อลดความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เหลือ 5 โวลต์ จ่ายให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ และ IC LM1117 3.3 เพื่อลดความต่างศักย์ไฟฟ้าลงเหลือ 3.3 โวลต์ จ่ายให้กับเอสดีการ์ด และ บวก ลบ 9 โวลต์ ให้กับวงจรรวม PKD01

### 2.2. ทดสอบการเขียนข้อมูลลงเอสดีการ์ด

เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละรหัส โดยมีส่วนสำคัญคือ สร้างตัวแปร 1024 ตัว เพื่อทำหน้าที่เป็นช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพา จากนั้นทดลองให้แต่ละช่องเก็บค่าตัวเลข และทดสอบการเขียนลงสู่เอสดีการ์ดแล้ว นำเอสดีการ์ดที่ผ่านการเขียนมาเปิดอ่านด้วยคอมพิวเตอร์

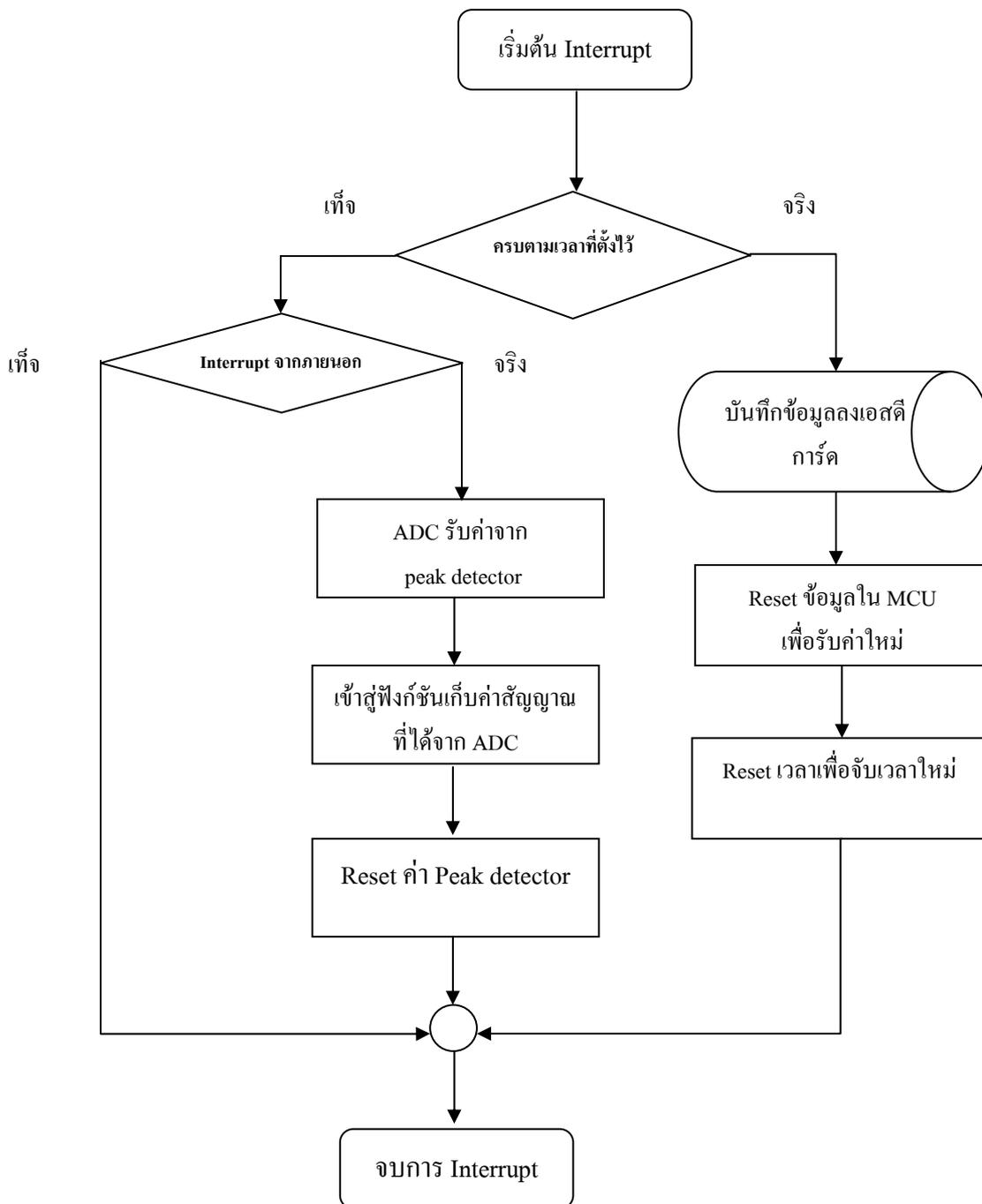
หลังจากทดสอบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ และวงจรติดต่อบetween ไมโครคอนโทรลเลอร์กับเอสดีการ์ดสำเร็จแล้ว จึงนำวงจรทั้งหมดประกอบเข้าด้วยกันซึ่งเป็นวงจรหลักของเครื่อง MCA ชนิดพกพา จากนั้นออกแบบวงจรควบคุม และแสดงผลเพิ่มเติม จากนั้นเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมีผังการทำงานดังภาพที่ 23 และภาพที่

## โปรแกรมการทำงานหลัก



ภาพที่ 23 ผังการทำงานของโปรแกรมหลัก

### โปรแกรมเมื่อเกิดการ Interrupt



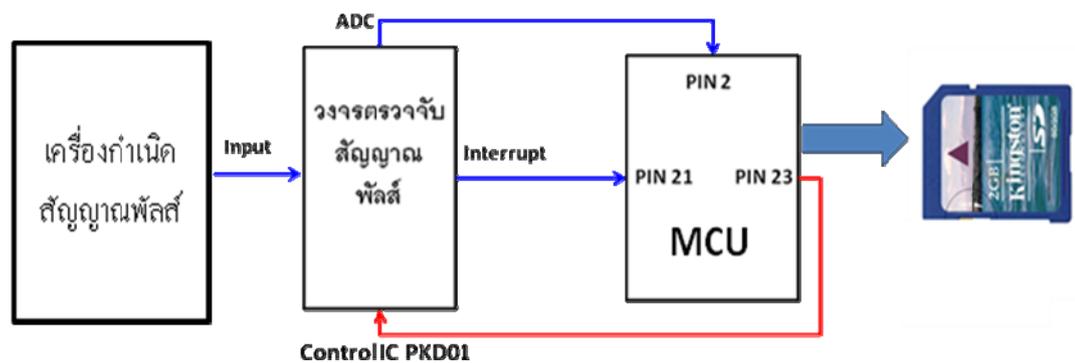
ภาพที่ 24 ผังการทำงานของโปรแกรมในส่วนการ Interrupt

### 3. ทดสอบเครื่อง MCA ชนิดพกพา

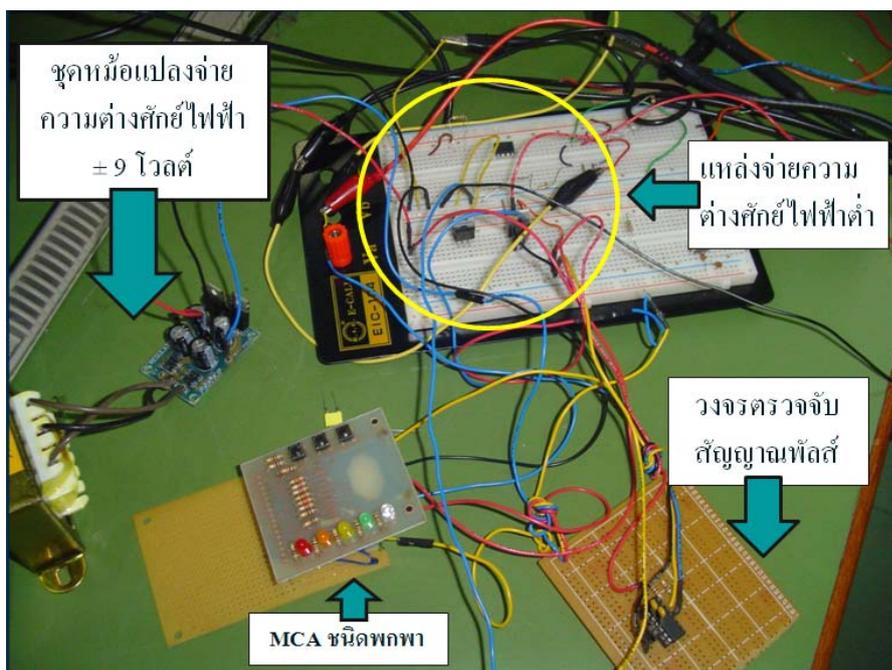
การทดสอบเครื่อง MCA ชนิดพกพา สามารถแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วนดังนี้

#### 3.1. ทดสอบการเก็บยอดสัญญาณพัลส์ทางเข้าลงสู่ช่อง

นำเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์มาตรฐานของบริษัท Canberra รุ่น 807 ต่อเข้ากับวงจรเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้น ตามภาพที่ 25 จากนั้นต่อแหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าความต่างศักย์ไฟฟ้า 9 โวลต์กับ IC รหัส L7805 เพื่อลดความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เหลือ 5 โวลต์ จ่ายให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ และ IC LM1117 3.3 เพื่อลดความต่างศักย์ไฟฟ้าลงเหลือ 3.3 โวลต์ จ่ายให้กับ เอสดีการ์ด และ  $\pm 9$  โวลต์ ให้กับวงจรรวม PKD01



ภาพที่ 25 การต่ออุปกรณ์ในการทดสอบการเก็บยอดสัญญาณพัลส์ทางเข้าลงสู่ช่อง



ภาพที่ 26 วงจรในการทดสอบความถูกต้องในการเก็บยอดสัญญาณพัลส์ทางเข้าลงสู่ช่อง

ตั้งเวลาให้เครื่อง MCA ที่พัฒนาขึ้นเขียนข้อมูลลงเอสดีการ์ดทุกๆ 1 นาที เริ่มจ่ายพัลส์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 0.2 โวลต์ ความถี่ 50 รอบต่อวินาที โดยเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าครั้งละ 0.2 โวลต์ ทำการวัดจนถึง 5.0 โวลต์ โดยทำการทดลองทั้งหมด 5 ชั่วโมง

นำค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งอยู่ในเอสดีการ์ด มาเปิดอ่าน และบันทึกผลการทดลอง จากนั้นนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณ โดยค่าที่ได้จากการคำนวณหาได้จากสมการ ที่ 4 ดังนี้

ช่อง (Channel) ที่สัมพันธ์กับความต่างศักย์ไฟฟ้า =  $V_{in}/C$  .....(4)

เมื่อ  $V_{in}$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้า มีหน่วยเป็น โวลต์

C คือ ช่วงของความต่างศักย์ไฟฟ้าของทุกๆช่อง ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่สามารถคำนวณได้จาก

$$C = \frac{\text{ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ ADC รับได้}}{\text{จำนวนช่องทั้งหมดของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง}}$$

เมื่อ จำนวนช่องทั้งหมดของเครื่อง MCA ช่องชนิดพกพา หาได้  
จาก สูตร  $2^n$  เมื่อ  $n$  คือ จำนวนบิตของวงจร ADC

จากสมการที่ 4 สามารถนำมาคำนวณหาค่า  $C$  และช่องที่สัมพันธ์กับโวลต์ได้ดังนี้  
จาก เครื่อง MCA ชนิดพกพาในงานวิจัย ใช้หน่วยประมวลผล คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ PIC  
18F2620 ซึ่งมี วงจร ADC แบบ 10 บิตอยู่ภายใน และรับค่าโวลต์สูงสุดได้ที่ 5 โวลต์ ดังนั้น ค่า  $C$   
จึงมีค่าเท่ากับ  $5/1024 = 0.004882813$  โวลต์/ช่อง

ตารางที่ 9 ช่องที่สัมพันธ์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้า

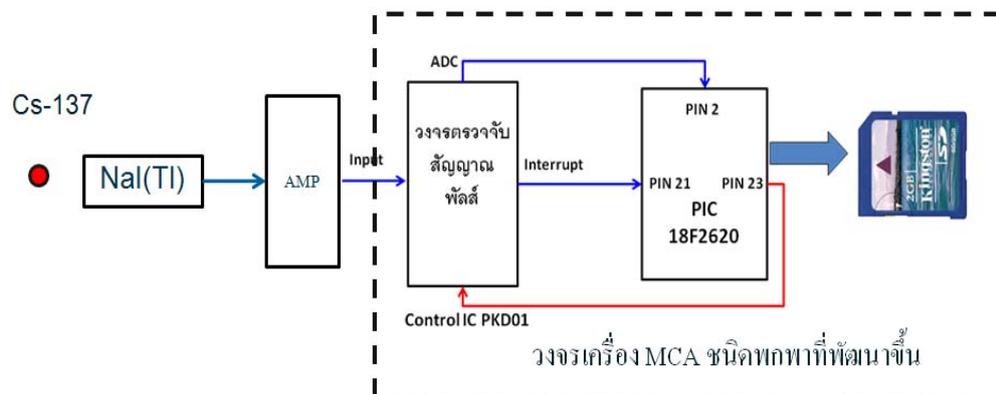
ความต่างศักย์ไฟฟ้าทางเข้า ( $V_{in}$ , โวลต์)	ช่อง (Channel)
0.2	41
0.4	82
0.6	123
0.8	164
1.0	205
1.2	246
1.4	287
1.6	328
1.8	369
2.0	410
2.2	451
2.4	492
2.6	532
2.8	573
3.0	614
3.2	655
3.4	696

ตารางที่ 9 ช่องที่สัมพันธ์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้า (ต่อ)

ความต่างศักย์ไฟฟ้าทางเข้า (Vin, โวลต์)	ช่อง (Channel)
3.6	737
3.8	778
4.0	819
4.2	860
4.4	901
4.6	942
4.8	983
5.0	1023

### 3.2. ทดสอบความสามารถในการตรวจวัดรังสี

นำหัววัดรังสีชนิดซิลิคอนทิลเลชันผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) ยี่ห้อ Ortec รุ่น 905-1 ซึ่งทำงานร่วมกับหลอดทวีคูณแสง ยี่ห้อ Ortec รุ่น 276 ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง เพื่อจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง 800 โวลต์ให้กับหัววัดรังสี จากนั้นนำสัญญาณที่ได้จากหัววัดต่อกับ โมดูลขยายสัญญาณพัลส์ (Amplifier) ยี่ห้อ Canberra รุ่น 2022 เพื่อขยายสัญญาณ ปรับค่า Gain เท่ากับ 50 และนำเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้นต่อเข้ากับ โมดูลขยายพัลส์ ดังภาพที่ 27 จากนั้นทำการวัดต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานซีเซียม-137 ความแรง  $10\mu\text{Ci}$  ที่มีการจัดชุดตะกั่วกำบัง รังสีดังภาพที่ 28 เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นทำการทดลองเปลี่ยนเครื่อง MCA จากเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้น เป็นเครื่อง MCA รุ่น TRUMP ของบริษัท ORTEC โดยใช้อุปกรณ์ชุดเดียวกับการทดลองตรวจวัดรังสีด้วยเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้นเป็นเวลา 1 นาที นำผลการวัดที่ได้จาก เครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับเครื่อง MCA รุ่น TRUMP ของบริษัท ORTEC



ภาพที่ 27 การจัดอุปกรณ์ในการทดสอบความสามารถในการตรวจวัดรังสี



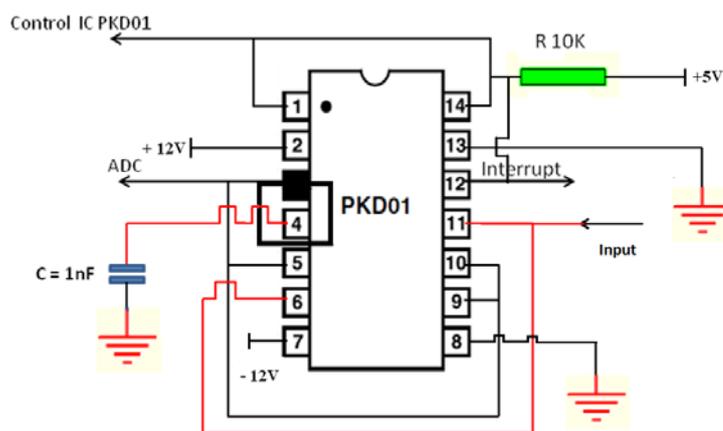
ภาพที่ 28 หัววัดรังสีและการจัดชุดตะกั่วกำบังรังสี

## ผลและวิจารณ์

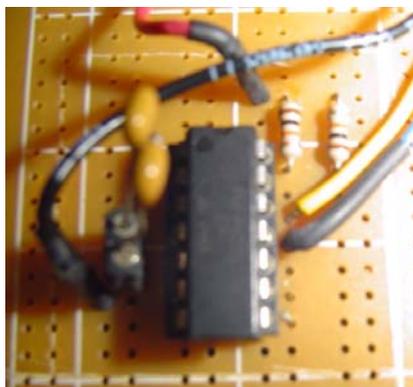
### 1. ศึกษาออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์

#### 1.1 ออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์

การออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ทางเข้า ได้นำวงจรรวมรหัส PKD01 ซึ่งมี วงจรตรวจจับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด และวงจรเปรียบเทียบอยู่ภายในมาใช้เป็นส่วนประกอบหลัก โดยจากการทดลอง สามารถออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ ดังแสดงในภาพที่ 29 ซึ่งเป็นผังวงจร และภาพที่ 30 แสดงวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 29 ผังวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์



ภาพที่ 30 วงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการทดลอง

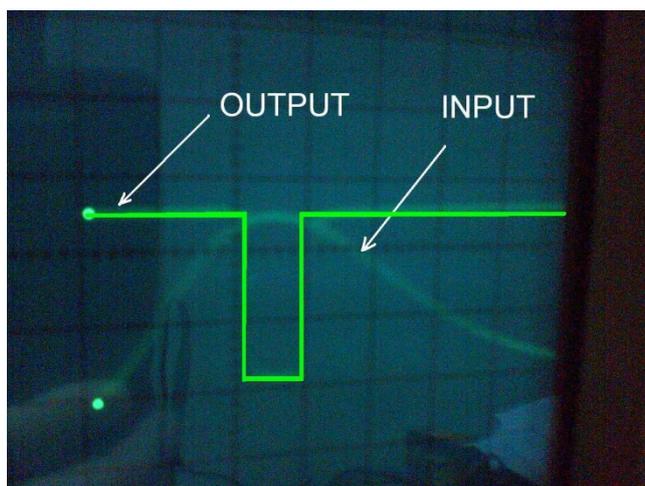
การทำงานเริ่มจาก เมื่อสัญญาณพัลส์ในรูปความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าสู่วงจรทาง INPUT สัญญาณจะถูกส่งต่อไปให้กับวงจรตรวจจับสัญญาณสูงสุด และวงจรเปรียบเทียบที่อยู่ภายในวงจรรวมเบอร์ PKD01 ผ่านทางขา 6 และ 11 ตามลำดับ ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะถูกเก็บเข้าสู่ตัวเก็บประจุ C ความจุ 1 nF ซึ่งต่อกับขา 4 ของวงจรรวมเบอร์ PKD01 ตลอดเวลาจนถึงจุดสูงสุดของพัลส์ที่เข้ามา วงจรจะทำการเก็บค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดไว้ ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดนี้จะถูกส่งออกมาทางขาที่ 3 ของวงจรรวมเบอร์ PKD01 จากนั้นสัญญาณจากขาที่ 3 จะถูกแบ่งออกเป็นสองทางคือ ส่งให้กับวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่อยู่ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลที่ได้ต่อไป และส่งให้กับวงจรเปรียบเทียบ วงจรเปรียบเทียบจะทำงานโดยเปลี่ยนสถานะจากลอจิกสูงเป็นลอจิกต่ำออกทางขาที่ 12 ของวงจรรวมเบอร์ PKD01 ซึ่งการเปลี่ยนสถานะนี้จะเกิดเมื่อถึงจุดสูงสุดของพัลส์ทางเข้าเท่านั้น จากนั้นสัญญาณที่ได้จากขาที่ 12 นี้จะนำไปต่อเข้ากับขา Interrupt ของไมโครคอนโทรลเลอร์

เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลเสร็จจะส่งสัญญาณมาที่วงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ผ่านทางขา Control IC PKD01 เพื่อ Reset วงจรรวมเบอร์ PKD01 ให้รับสัญญาณพัลส์สัญญาณต่อไป

## 1.2 ทดสอบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์

### 1.2.1 ทดสอบการตรวจจับยอดพัลส์

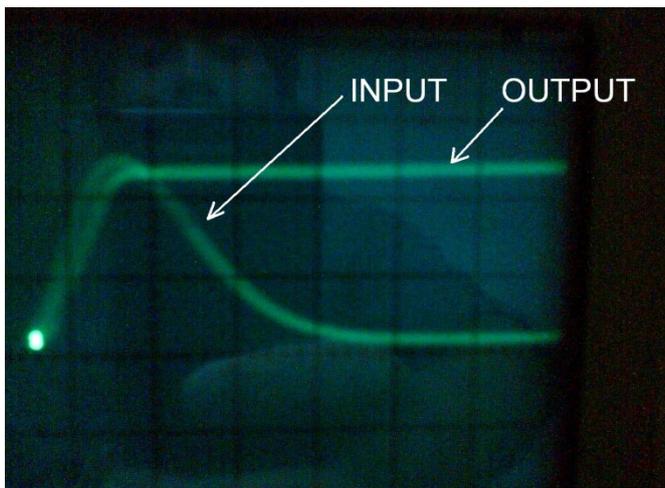
สัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์จะถูกส่งเข้าสู่วงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ ส่งผลให้ได้ OUTPUT ดังภาพที่ 31 แสดง OUTPUT ที่ได้จากขาที่ 12 ของวงจรรวมเบอร์ PKD01 ซึ่งขาที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เมื่อตรวจพบยอดพัลส์ จากภาพเมื่อสังเกตกราฟ OUTPUT พบว่า เมื่อ INPUT มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าใกล้จุดสูงสุด OUTPUT จะเปลี่ยนสถานะจากความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็น 0 โวลต์และคงค่าสถานะ 0 โวลต์ไว้ช่วงเวลาหนึ่ง โดยการทดลองนี้ให้คงสถานะ 0 โวลต์เป็นเวลา 2 มิลลิวินาที เพื่อให้ตัวเก็บประจุเก็บความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดไว้ จากนั้นจะกลับมาเป็น 5 โวลต์เช่นเดิม



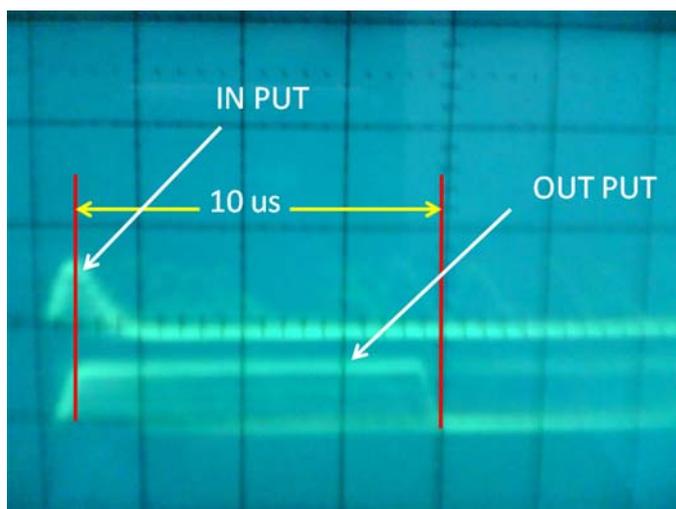
ภาพที่ 31 สัญญาณทางออกการตรวจจับยอดพัลส์

### 1.2.2 ทดสอบการคงค่าสัญญาณพัลส์สูงสุด

เมื่อจ่ายพัลส์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ พบว่า เส้นกราฟ INPUT เริ่มจาก 0 โวลต์เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดโดยที่เส้นกราฟ INPUT และ OUTPUT จะมีค่าเท่ากัน แต่เมื่อสัญญาณ INPUT เกินจุดสูงสุดไปพบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของ INPUT จะลดกลับลงมาถึงศูนย์ แต่ OUTPUT จะคงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดไว้ดังภาพที่ 32 ซึ่งค่าที่คงไว้นี้จะถูกส่งให้กับวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อแปลงสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อใช้ประมวลผลต่อไป เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลเสร็จจะส่งสัญญาณให้วงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์เริ่มต้นการทำงานใหม่ ซึ่งช่วงเวลาที่เครื่อง MCA รับสัญญาณพัลส์ และประมวลผล เครื่องจะไม่สามารถรับสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นขณะประมวลผลได้ ซึ่งเรียกช่วงเวลานี้ว่า dead time แสดงดังภาพที่ 33 โดยเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้นมีค่า dead time เท่ากับ 10 ไมโครวินาที เนื่องจาก โปรแกรมการทำงานของเครื่องที่เขียนขึ้นกำหนดให้เวลาที่เครื่องทำงานมีค่า 10 ไมโครวินาที เพราะเป็นช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุสามารถเก็บประจุได้เต็มที่



ภาพที่ 32 สัญญาณทางออกการคงค่าสัญญาณพัลส์สูงสุด



ภาพที่ 33 ช่วงเวลา dead time ของเครื่อง MCA ชนิดพกพา

## 2. ออกแบบวงจรระบบบันทึกข้อมูลของเครื่อง MCA ชนิดพกพา

### 2.1. ออกแบบวงจรติดต่อกันระหว่าง ไมโครคอนโทรลเลอร์กับแอสดีการ์ด

เมื่อนำไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งสามรหัสคือ PIC18F2525 PIC18F2620 และ PIC18F2680 ต่อเข้ากับแอสดีการ์ดแบบ SPI MODE ได้วงจร ดังภาพที่ 34 โดยการต่อวงจรมีลักษณะ ดังนี้คือ

ขาที่ 7 ของไมโครคอนโทรลเลอร์เชื่อมกับ ขา CS ของเอสดีการ์ด ทำหน้าที่ส่งคำสั่งควบคุม เริ่มต้นและยกเลิกการติดต่อระหว่างเอสดีการ์ดกับไมโครคอนโทรลเลอร์ การติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับเอสดีการ์ดเริ่มต้นเมื่อ ไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการติดต่อกับเอสดีการ์ดจะส่งสัญญาณลอจิกต่ำจากขาที่ 7 ไปที่ขา CS ของเอสดีการ์ด ถือเป็นารเริ่มต้นการเชื่อมต่อและ เมื่อต้องการยกเลิกการติดต่อ จะส่งสัญญาณลอจิกสูง ไปที่ขา CS เช่นเดิมเพื่อยกเลิกการติดต่อ เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ติดต่อกับเอสดีการ์ดสำเร็จแล้วจะสามารถส่ง และรับข้อมูลจากเอสดีการ์ดได้ โดยขาที่ 15 (IN PUT) ทำหน้าที่รับข้อมูลจากเอสดีการ์ดเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนขาที่ 16 (OUT PUT) ทำหน้าที่ส่งข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อเขียนลงสู่เอสดีการ์ด ขาที่ 20 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นขารับความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์เพื่อให้พลังงานแก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งแตกต่างกับขา VCC ของเอสดีการ์ดที่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 2.7 – 3.3 โวลต์ ดังนั้นจึงต้องมีการลดความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 5.0 โวลต์ เป็น 3.3 โวลต์ โดยการใช้ IC ลดความต่างศักย์ไฟฟ้าคือ LM1117T 3.3 เพื่อลดแรงดันให้กับเอสดีการ์ด ซึ่งหากไม่ทำการลดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะส่งผลให้ตัวเอสดีการ์ด เสียหาย

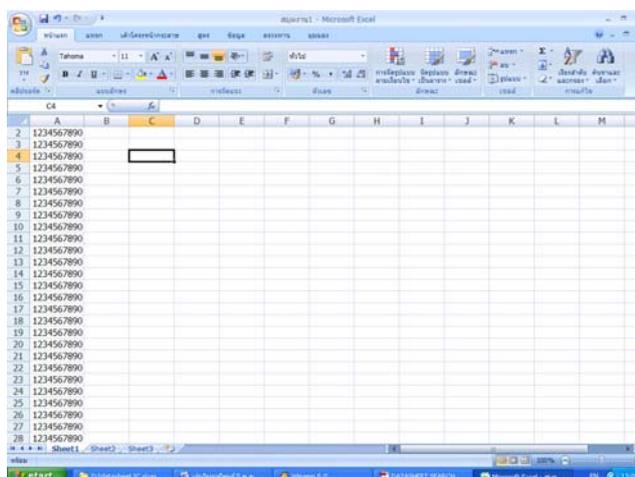


2.2. ทดสอบการเขียนข้อมูลลงเอสดีการ์ด

จากการทดลองนำไมโครคอนโทรลเลอร์เชื่อมต่อกับเอสดีการ์ด ด้วยรูปแบบ SPI MODE พบว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์ รหัส PIC 18F2620 และ PIC18F2680 สามารถเชื่อมต่อ และเขียนข้อมูลตัวเลข 1 ถึง 0 ลงสู่เอสดีการ์ดในรูปแบบแฟ้มนามสกุล .xls ที่รองรับโดยโปรแกรม Microsoft Excel ได้ดังภาพที่ 35 โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ รหัส PIC 18F2620 และรหัส 18F2680 ใช้หน่วยความจำแรมในการโปรแกรมไปร้อยละ 71 และ 89 ส่วนหน่วยความจำรวม พบว่าทั้งสองไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งสองรหัสใช้ไปเท่ากันคือ ร้อยละ 15 ในขณะที่ไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส PIC 18F2525 ไม่สามารถทำงานร่วมกับโปรแกรมที่เขียนได้เนื่องจากมีหน่วยความจำไม่เพียงพอ (ตารางที่ 10)

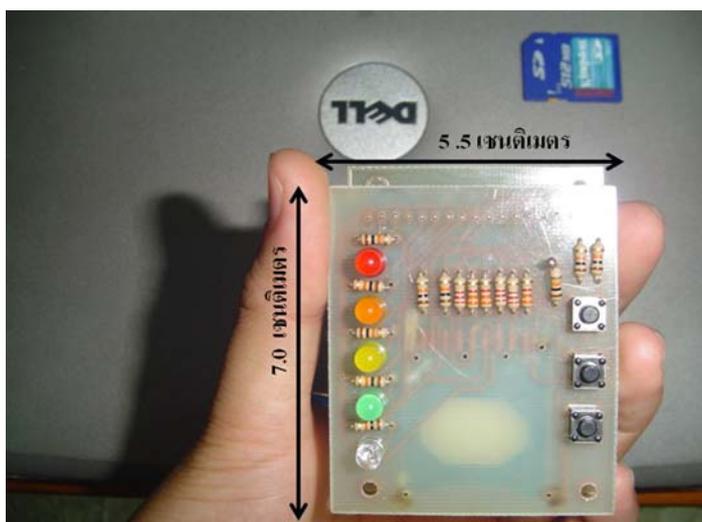
ตารางที่ 10 การเขียนข้อมูลลงเอสดีการ์ดของไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละรหัส

รหัสไมโครคอนโทรลเลอร์	การใช้หน่วยความจำแรม (%)	การใช้หน่วยความจำรวม (%)	การเขียนข้อมูลลงเอสดีการ์ด
PIC 18F2525	-	-	ไม่สามารถทำงานได้
PIC 18F2620	71	15	สามารถทำงานได้
PIC 18F2680	89	15	สามารถทำงานได้

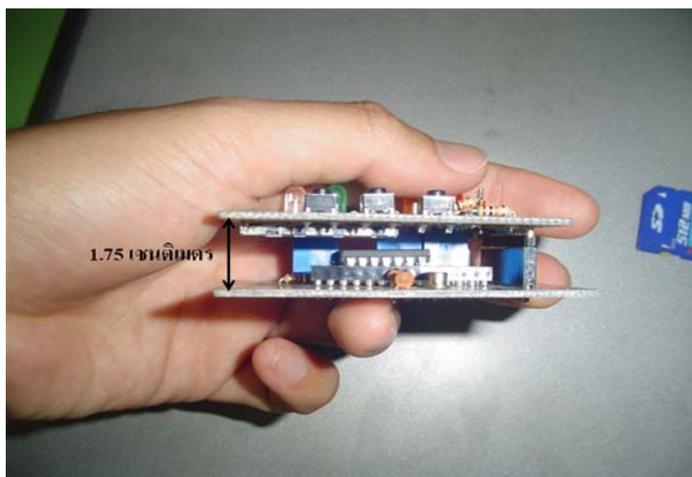


ภาพที่ 35 รูปแบบข้อมูลที่เขียนลงสู่เอสดีการ์ด

เมื่อทดสอบการเขียนข้อมูลลงสู่เอสดีการ์ดแล้ว จึงนำวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ และ วงจรแสดงผล และควบคุมได้แก่ LED แสดงสถานการณ์ทำงานของเครื่อง และปุ่มกด เพื่อควบคุม การทำงาน มาประกอบเข้าด้วยกันทำให้ได้วงจรเครื่อง MCA ชนิดพกพา หลังจากทดสอบวงจรแล้ว งานวิจัยนี้ได้ออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board) หรือแผ่น PCB ดังภาพที่ 36 และ 37 โดยมีผังวงรดังภาพที่ 38



ภาพที่ 36 ความกว้างและความยาวของแผ่นวงจรพิมพ์ของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้น



ภาพที่ 37 ความหนาของแผ่นวงจรพิมพ์ของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้น



### 3. ทดสอบเครื่อง MCA ชนิดพกพา

#### 3.1. การทดสอบการเก็บยอดสัญญาณพัลส์ทางเข้าลงตู้ช่อง

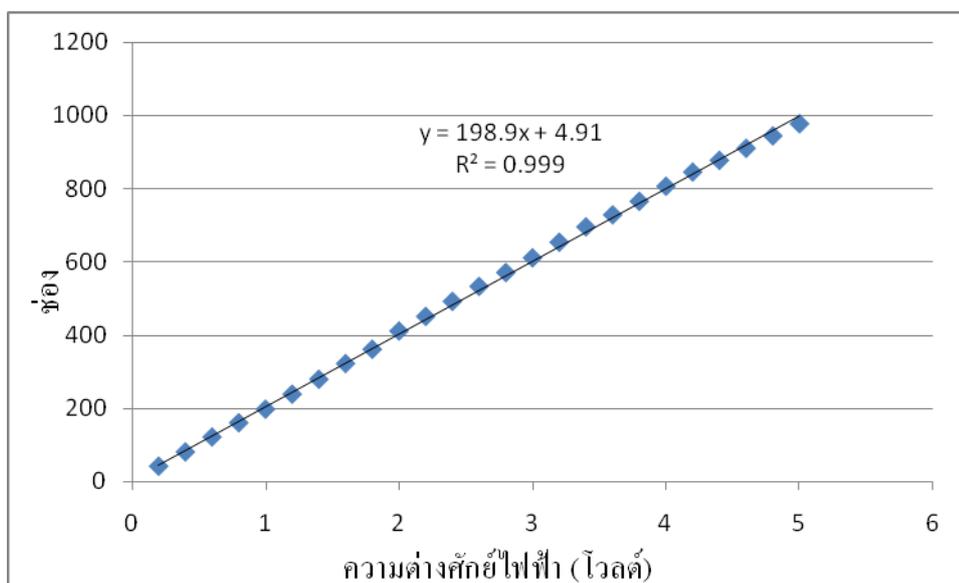
ผลการเก็บยอดพัลส์ทางเข้าลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพา ที่พัฒนาขึ้นแสดงในตารางที่ 11 เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างช่องที่เก็บยอดพัลส์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าทางเข้าพบว่า ค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ตามสมการ  $y = 198.9x + 4.91$  เมื่อ  $y$  คือ ช่อง  $x$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยมีค่าสหสัมพันธ์เชิงเส้น ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.999 ดังภาพที่ 39

ตารางที่ 11 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพา

ความต่างศักย์ไฟฟ้าทางเข้า (โวลต์)	ช่องที่สัมพันธ์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าทางเข้า	
	ค่าคำนวณ	ค่าจากการทดลอง
0.2	41	40
0.4	82	79
0.6	123	120
0.8	164	159
1.0	205	196
1.2	246	237
1.4	287	278
1.6	328	321
1.8	369	360
2.0	410	410
2.2	451	450
2.4	492	491
2.6	532	532
2.8	573	570
3.0	614	610
3.2	655	653
3.4	696	695

ตารางที่ 11 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงสู่ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพา (ต่อ)

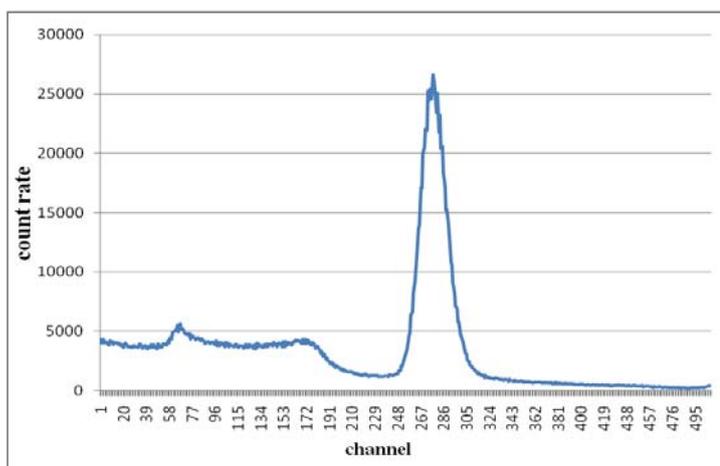
ความต่างศักย์ไฟฟ้าทางเข้า (โวลต์)	ช่องที่สัมพันธ์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าทางเข้า	
	ค่าคำนวณ	ค่าจากการทดลอง
3.6	737	728
3.8	778	765
4.0	819	806
4.2	860	845
4.4	901	877
4.6	942	910
4.8	983	944
5.0	1023	977



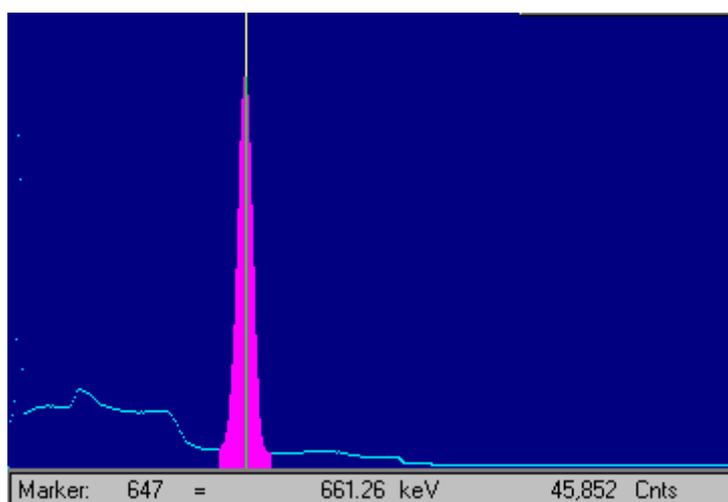
ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องที่เก็บยอดพัลส์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าทางเข้า

### 3.2. ทดสอบความสามารถในการตรวจวัดรังสี

การวัดต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 ความแรง 10  $\mu\text{Ci}$  เวลา 1 นาที ด้วยเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้นแสดงสเปกตรัมพลังงานในภาพที่ 40 พบว่า ลักษณะสอดคล้องกับสเปกตรัมของซีเซียม - 137 ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง MCA มาตรฐานดังแสดงในภาพที่ 41



ภาพที่ 40 สเปกตรัมพลังงานของ Cs-137 จากเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้น



ภาพที่ 41 สเปกตรัมพลังงานของ Cs-137 จากเครื่อง MCA มาตรฐาน

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

การศึกษาออกแบบ และทดสอบการทำงานของวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์พบว่า เมื่อเกิดสัญญาณพัลส์ขึ้น วงจรดังกล่าวสามารถตรวจจับสัญญาณยอดพัลส์ทางเข้า และสามารถคงค่ายอดพัลส์ได้ แสดงให้เห็นว่าวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์มีความสามารถในการทำงาน

การติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับเอสดีการ์ด พบว่า สามารถติดต่อกันได้ในรูปแบบ SPI MODE ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำการทดลองทั้ง 3 รหัสคือ รหัส PIC 18F2525 PIC18F2620 และรหัส PIC18F2680 สามารถเชื่อมต่อกับเอสดีการ์ดของบริษัท Kingston ความจุ 512 MB ได้ จากการทดสอบการเขียนข้อมูลตัวเลขลงสู่เอสดีการ์ด พบว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส PIC18F2620 และรหัส PIC18F2680 สามารถทำงานได้โดยใช้หน่วยความจำแบบอ่านและเขียนหรือแรมร็อยละ 71 และ 89 ตามลำดับแต่ ไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส PIC18F2525 ไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากหน่วยความจำแบบอ่านและเขียนของไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส PIC18F2525 มีพื้นที่ไม่เพียงพอกับการเก็บข้อมูล

การทดสอบการเก็บยอดพัลส์ลงสู่ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้น พบว่า ช่องที่เก็บยอดพัลส์มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าทางเข้าในช่วง 0.2 ถึง 5.0 โวลต์ โดยมีค่าสหสัมพันธ์เชิงเส้น ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.999 การทดสอบการวัดต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานซีเซียม-137 ความแรง 10  $\mu\text{Ci}$  พบว่า กราฟที่ได้มีลักษณะสอดคล้องกับกราฟมาตรฐานของซีเซียม-137 ที่ได้จากเครื่อง MCA รุ่น TRUMP ของบริษัท ORTEC

จากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่าสามารถพัฒนาระบบบันทึกข้อมูลของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่องชนิดพกพาได้โดยนำเอสดีการ์ดมาเป็นส่วนบันทึกข้อมูล และจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบแฟ้มนามสกุล .xls ที่สามารถเปิดอ่านได้ด้วยโปรแกรมที่รองรับเช่น Microsoft Office Excel หรือโปรแกรม Open Office ซึ่งสะดวกในการอ่าน และนำข้อมูลมาเขียนกราฟ

### ข้อเสนอแนะ

เครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้นมีค่า dead time สูง (10 ไมโครวินาที) ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ให้ใช้เวลาในการตรวจจับและ Reset น้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่าเครื่องใช้หน่วยความจำ แรม และ รอม สูง ซึ่งส่งผลกับการตั้งระยะเวลาในการวัดที่จำกัด ทั้งนี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีหน่วยความจำสูงขึ้น

ข้อมูลที่บันทึกในเอสดีการ์ดของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้น ไม่สามารถแสดงวันและเวลาในการเก็บข้อมูลได้ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการนำวงจรรวมที่จัดการเกี่ยวกับเวลา ที่เรียกว่า RTC (Real Time Clock) มาออกแบบให้สามารถทำงานร่วมกับเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่พัฒนาขึ้นได้

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ธีรวัฒน์ ประกอบผล. 2541. ไมโครโปรเซสเซอร์ หลักและการประยุกต์ใช้งาน. แมคกรอ-ฮิล, กรุงเทพฯ. แปลจาก C.M. Gilmore. **Microprocessors Principles and Applications**. The McGraw-Hill Companies, New York. 732 น.
- ชวิช ชิตตระกูล. 2541. การตรวจและวัดรังสี. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- นภัทร วัฒนเทพินทร์. 2545. วงจรดิจิตอล และการออกแบบลอจิก. สกายบุ๊ก. กรุงเทพฯ.
- ปกรณ์ สานติวัฒน์ และปนัดดา แสงเทียนชัย. 2552. การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล. Analog To Digital Converter. Available Source: <http://capet1.blogspot.com/2009/02/analog-to-digital-converter.html>, February 24, 2009.
- นवलวิ รุ่งชนเกียรติ. 2536. เทคนิคการวัดรังสี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- มนตรี ศิริปรัชญานันท์. 2545. **Engineering Electronics Lab II, Lab 9 Signal Processing Circuits**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ.
- อาร์มกี๊ จันทรไย. 2549. อ่าน และเขียนการ์ด SD และMMC ด้วย PIC16F876 ตอนที่ 3. **เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์** 24 (291): 156-160.
- อיתיที จำกัด. ม.ป.ป. รายละเอียดขาสัญญาณของ SD CARD. **คู่มือการใช้งาน ET-MINI I/O**. 1 (3): 3-4.
- AMP TEK. 2004. **Multichannel analyzer pocket MCA**. Pocket MCA. Available Source: <http://www.amp tek.com>, February 24, 2006.
- Analog device. 2001. **Monolithic Peak Detector with Reset-and-Hold Mode**. Data sheet **PKD01**. Analog Devices, Inc. U.S.A.

Bello, D.S., B. Nauta and J. Visschers. 2001. **Design of analog-to-digital converters for energy-sensitive hybrid pixel detectors.** Design of analog-to-digital converters for energy-sensitive hybrid pixel detectors. Available Source: <http://www.analog.com>, September 10, 2006.

Canberra. 2003. **Model ASA-100 NaI Multichannel Analyzer board.** Multichannel Analyze Board. Available Source: <http://www.Canberra.com>, September 13, 2006.

Cardoso, J.M., V. Amorim, R. Bastos, R. Madeira, J.B. Simões and C.M.B.A. Correia. 2006. **A Very Low-Cost Portable Multichannel Analyzer.** Instrumentation Center of the Physics Department University of Coimbra, Portugal.

Fazzi, A., L.Magnoni, L.Tristano and V. Varoli. 2001. A portable dual-input multichannel analyzer with large onboard memory for dual isotope diagnostic techniques. **Nuclear Science Symposium Conference Record.** 2: 160-163.

Khan and Shahid 1987. A single chip microcontroller based portable multichannel analyzer. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.** 2: 325-330.

Lima, H.P., G.P. Guedes, A.F. Barbosa and J.M. Seixas. 2004. A fast multichannel analyzer for radiation detection applications. **Instrumentation and Measurement.** 2: 378-383.

Microchip 2004. **PIC18F2525/2620/4525/4620 Data Sheet.** Microchip, Inc. U.S.A.

Mikroelektronika. 2006. **MikroC C Compiler For Microchip PIC Microcontrollers.** Mikroelektronika, Inc. U.S.A.

Tarad. 2007. **SD Card.** kington SD card. Available Source:

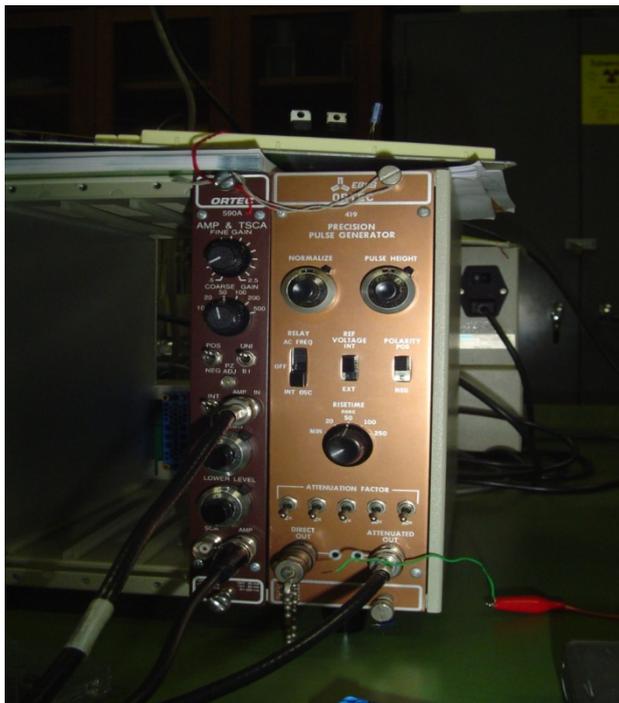
[http://www.tarad.com/td\\_computech/img-lib/spd\\_20070722122250\\_b.jpg](http://www.tarad.com/td_computech/img-lib/spd_20070722122250_b.jpg), September 23, 2007.

Tolvel. 2006. **Multichannel analyzer analog to digital converter products.**

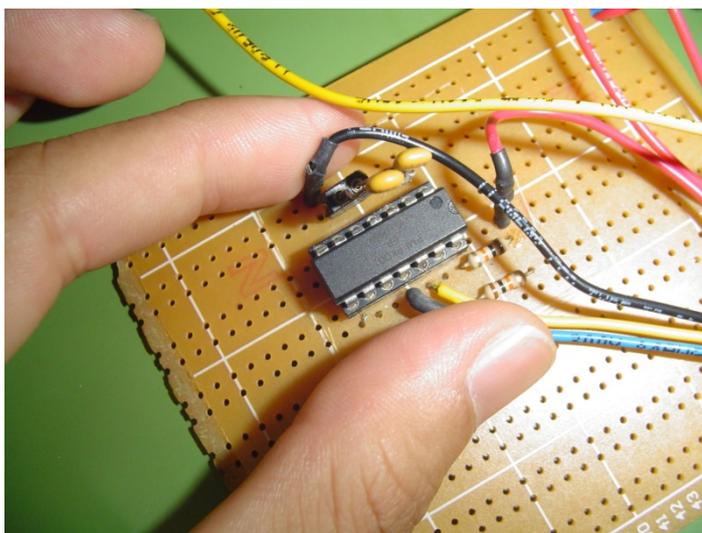
Multichannel analyzer analog to digital converter products. Available Source:

<http://www.tolvel.com>, February 24, 2006.

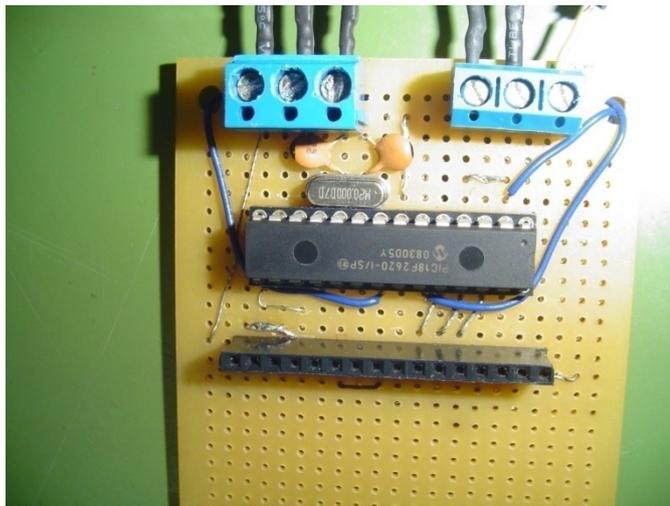
**ภาคผนวก**



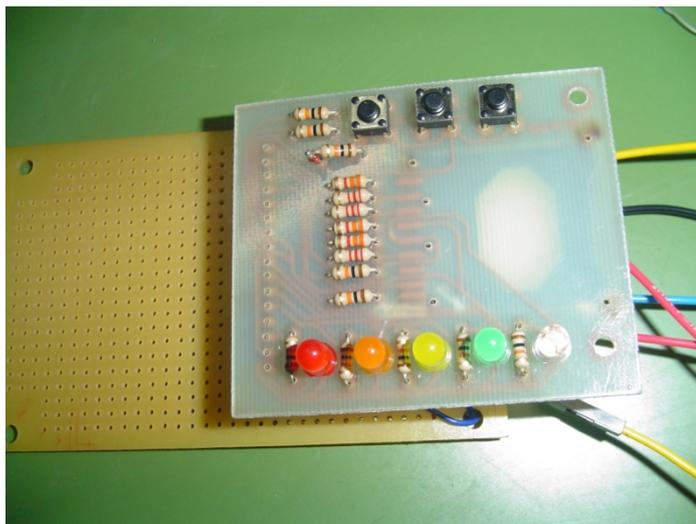
ภาพผนวกที่ 1 เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์มาตรฐาน (Pulser) บริษัท Canberra รุ่น 807 (ขวา) และ โมดูลขยายสัญญาณพัลส์ (Amplifier) บริษัท Canberra รุ่น 2022 (ซ้าย)



ภาพผนวกที่ 2 ขนาดวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพผนวกที่ 3 ไมโครคอนโทรลเลอร์รหัส PIC18F2620 ของเครื่อง MCA ชนิดพกพา

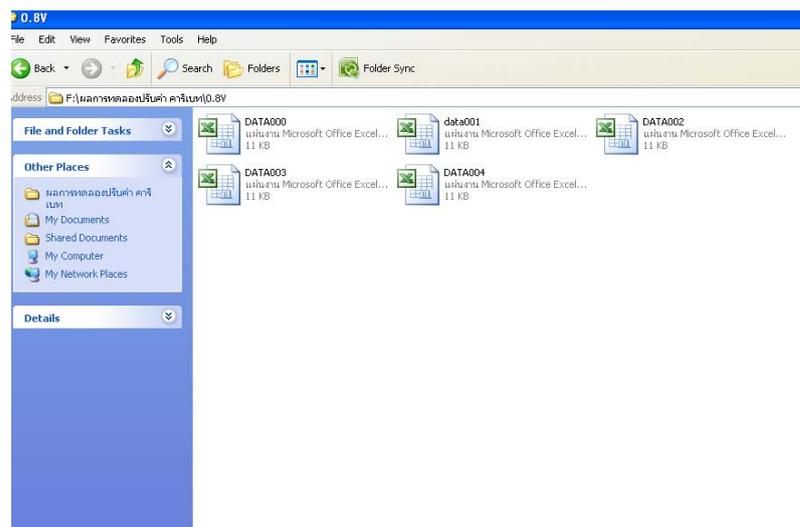


ภาพผนวกที่ 4 เครื่อง MCA ชนิดพกพา ที่อยู่ระหว่างการวิจัย

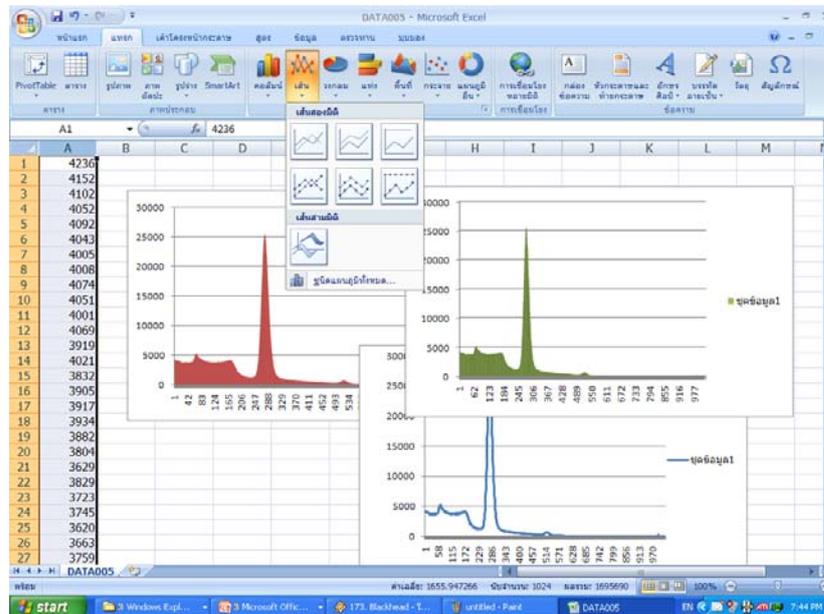
ประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนล่างเป็นวงจรหลักประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และช่องรับ INPUT ช่องต่อแหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำ ส่วนบนเป็นส่วนควบคุม และช่องใส่เอสดีการ์ด จากภาพจะเห็น LED 4 ดวงทำหน้าที่แสดงสถานการณ์ทำงาน และปุ่มกด ทำหน้าที่ตั้งเวลาในการวัด การเริ่มต้นการวัด



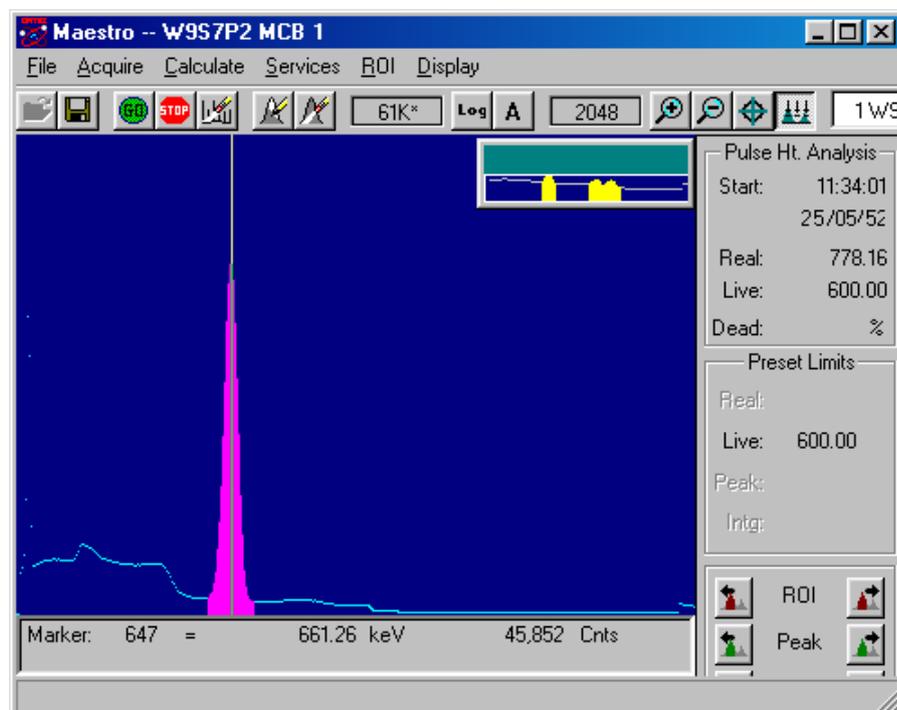
ภาพผนวกที่ 5 เครื่อง MCA ชนิดพกพา ในรูปแบบการทำแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB)



ภาพผนวกที่ 6 ลักษณะข้อมูลในเอสดีการ์ดเมื่อเปิดอ่านด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งพบว่าข้อมูลอยู่ในรูป Microsoft Excel



ภาพผนวกที่ 7 การนำข้อมูลการวัดรังสีจากเอสดีการ์ดมาเขียนกราฟใน Microsoft Excel



ภาพผนวกที่ 8 สเปกตรัมซีเซียม -137 จากเครื่อง MCA รุ่น TRUMP ของบริษัท ORTEC

**ตารางผนวกที่ 1** ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
0.2 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.2 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
25	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0
28	12	10	15	9	7	10.6
29	7	10	13	11	6	9.4
30	14	13	10	10	8	11.0
31	16	17	16	7	19	15.0
32	11	14	18	13	12	13.6
33	7	8	11	17	12	11.0
34	13	13	13	14	16	13.8
35	12	11	9	18	12	12.4
36	20	13	17	22	18	18.0
37	12	22	24	22	17	19.4
38	24	29	21	21	24	23.8
39	50	308	304	295	327	256.8
40	1262	1286	1272	1218	1245	1256.6
41	240	24	16	28	29	67.4
42	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ 2 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
0.4 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.4 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
62	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0
64	8	12	9	6	2	7.4
65	7	2	8	5	4	5.2
66	5	5	6	9	2	5.4
67	10	5	7	6	7	7.0
68	11	11	14	5	9	10.0
69	8	12	6	6	12	8.8
70	10	8	10	6	12	9.2
71	10	11	13	11	11	11.2
72	7	8	9	7	15	9.2
73	11	8	14	16	7	11.2
74	16	14	11	15	7	12.6
75	13	20	20	18	7	15.6
76	15	21	23	21	20	20.0
77	29	32	39	30	29	31.8
78	74	349	386	409	374	318.4
79	1593	1552	1547	1601	1578	1574.2
80	233	30	26	43	28	72.0
81	6	4	6	3	10	5.8
82	0	0	0	0	1	0.2
83	0	0	0	0	0	0
84	0	0	0	0	0	0

**ตารางผนวกที่ 3 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
0.6 โวลต์**

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
112	0	0	0	0	0	0
113	0	0	0	0	0	0
114	0	0	0	0	0	0
115	0	0	0	0	0	0
116	0	0	0	0	0	0
117	0	0	0	0	0	0
118	0	0	0	0	0	0
119	30	19	23	23	15	22
120	1897	1992	1886	1846	1887	1901.6
121	579	577	666	691	674	637.4
122	19	22	25	25	29	24
123	3	1	0	2	1	1.4
124	0	0	0	0	0	0
125	0	0	0	0	0	0
126	0	0	0	0	0	0
127	0	0	0	0	0	0

**ตารางผนวกที่ 4** ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
0.8 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
149	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0
151	0	0	0	0	0	0
152	0	0	0	0	0	0
153	0	0	0	0	0	0
154	0	0	0	0	0	0
155	0	0	0	0	0	0
156	3	2	2	4	1	1.8
157	15	13	12	15	11	10.2
158	660	650	655	554	516	475
159	1806	1882	1860	1836	1802	1837.2
160	163	154	153	156	160	157.2
161	5	3	2	4	5	3.8
162	0	0	0	0	0	0
163	0	0	0	0	0	0
164	0	0	0	0	0	0

**ตารางผนวกที่ 5** ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
1.0 โวลต์

ช่อง	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.0 โวลต์					ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
186	0	0	0	0	0	0
187	0	0	0	0	0	0
188	0	0	0	0	0	0
189	0	0	0	0	0	0
190	0	0	0	0	0	0
191	0	0	0	0	0	0
192	0	0	0	0	0	0
193	0	0	0	0	0	0
194	1	8	8	8	9	6.6
195	284	340	317	335	330	264.4
196	1883	1851	1871	1845	1842	1858.4
197	351	329	315	358	355	341.6
198	32	31	47	37	36	36.6
199	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0
201	0	0	0	0	0	0

**ตารางผนวกที่ 6 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต้งศักย์ไฟฟ้า  
1.2 โวลต์**

ช่อง	ค่าความต้งศักย์ไฟฟ้า 1.2 โวลต์					ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
227	0	0	0	0	0	0
228	0	0	0	0	0	0
229	0	0	0	0	0	0
230	0	0	0	0	0	0
231	0	0	0	0	0	0
232	0	0	0	0	0	0
233	0	0	0	0	0	0
234	0	0	0	0	0	0
235	6	7	7	7	6	5.4
236	155	303	437	537	678	391
237	1865	1807	1853	1848	1804	1835.4
238	310	251	189	144	101	199
239	0	0	71	39	32	28.4
240	0	0	0	0	0	0
241	0	0	0	0	0	0
242	0	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ 7 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
1.4 โวลต์

ช่อง	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.4 โวลต์					ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
267	0	0	0	0	0	0
268	0	0	0	0	0	0
269	0	0	0	0	0	0
270	0	0	0	0	0	0
271	0	0	0	0	0	0
272	0	0	0	0	0	0
273	0	0	0	0	0	0
274	0	0	0	0	0	0
275	0	0	0	0	0	0
276	2	2	2	2	4	2
277	132	138	81	138	109	119.6
278	2360	2493	1604	2493	1892	2168.4
279	165	144	255	144	207	183
280	0	0	0	0	0	0
281	0	0	0	0	0	0
282	0	0	0	0	0	0

**ตารางผนวกที่ 8** ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
1.6 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.6 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
312	0	0	0	0	0	0
313	0	0	0	0	0	0
314	0	0	0	0	0	0
315	0	0	0	0	0	0
316	0	0	0	0	0	0
317	0	0	0	0	0	0
318	0	0	0	0	0	0
319	0	0	0	0	0	0
320	26	264	195	432	26	183.4
321	2600	2446	2393	2542	2541	1984.4
322	350	91	99	29	31	120
323	0	24	37	0	0	12.2
324	0	0	0	0	0	0
325	0	0	0	0	0	0
326	0	0	0	0	0	0
327	0	0	0	0	0	0

**ตารางผนวกที่ 9 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.8 โวลต์**

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.8 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
350	0	0	0	0	0	0
351	0	0	0	0	0	0
352	0	0	0	0	0	0
353	0	0	0	0	0	0
354	0	0	0	0	0	0
355	0	0	0	0	0	0
356	0	0	0	0	0	0
357	0	0	0	0	0	0
358	1	3	2	1	3	1.8
359	231	310	206	204	317	207.4
360	2612	2681	2583	2684	2577	2627.4
361	91	10	7	15	4	25.4
362	0	0	0	0	0	0
363	0	0	0	0	0	0
364	0	0	0	0	0	0
365	0	0	0	0	0	0

**ตารางผนวกที่ 10** ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
2.0 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.0 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
400	0	0	0	0	0	0
401	0	0	0	0	0	0
402	0	0	0	0	0	0
403	0	0	0	0	0	0
404	0	0	0	0	0	0
405	0	0	0	0	0	0
406	0	0	0	0	0	0
407	0	0	0	0	0	0
408	0	0	0	0	0	0
409	49	280	327	667	348	324.4
410	2600	2621	2532	2217	2575	2509.0
411	40	53	43	18	81	47.0
412	0	0	0	0	0	0
413	0	0	0	0	0	0
414	0	0	0	0	0	0
415	0	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ 11 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
2.2 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.2 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
440	0	0	0	0	0	0
441	0	0	0	0	0	0
442	0	0	0	0	0	0
443	0	0	0	0	0	0
444	0	0	0	0	0	0
445	0	0	0	0	0	0
446	0	0	0	0	0	0
447	0	0	0	0	0	0
448	0	2	0	0	0	0.4
449	56	12	19	210	115	71.2
450	2658	2776	2767	2457	2460	2623.6
451	174	15	20	37	28	54.8
452	0	0	0	0	0	0
453	0	0	0	0	0	0
454	0	0	0	0	0	0
455	0	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ 12 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
2.4 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.4 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
480	0	0	0	0	0	0
481	0	0	0	0	0	0
482	0	0	0	0	0	0
483	0	0	0	0	0	0
484	0	0	0	0	0	0
485	0	0	0	0	0	0
486	0	0	0	0	0	0
487	0	0	0	0	0	0
488	0	0	0	0	0	0
489	1	0	0	0	0	0
490	52	2	4	0	1	11.8
491	2724	2764	2776	2685	2672	2724.2
492	10	38	19	17	30	22.8
493	0	0	1	2	1	0.8
494	0	0	0	0	0	0
495	0	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ 13 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
2.6 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.6 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
522	0	0	0	0	0	0
523	0	0	0	0	0	0
524	0	0	0	0	0	0
525	0	0	0	0	0	0
526	0	0	0	0	0	0
527	0	0	0	0	0	0
528	0	0	0	0	0	0
529	0	0	0	0	0	0
530	0	0	1	1	0	0.4
531	60	41	47	46	54	37.6
532	2766	2567	2813	2833	2529	2701.6
533	61	17	21	24	23	29.2
534	0	0	0	0	0	0
535	0	0	0	0	0	0
536	0	0	0	0	0	0
537	0	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ 14 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
2.8 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
560	0	0	0	0	0	0
561	0	0	0	0	0	0
562	0	0	0	0	0	0
563	0	0	0	0	0	0
564	0	0	0	0	0	0
565	0	0	0	0	0	0
566	0	0	0	0	0	0
567	0	0	0	0	0	0
568	1	2	1	0	0	0.6
569	53	46	37	64	13	32.0
570	2841	2812	2769	2809	2798	2805.8
571	2	1	12	9	10	6.8
572	0	0	0	0	0	0
573	0	0	0	0	0	0
574	0	0	0	0	0	0
575	0	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ 15 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
3.0 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 3.0 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
601	0	0	0	0	0	0
602	0	0	0	0	0	0
603	0	0	0	0	0	0
604	0	0	0	0	0	0
605	0	0	0	0	0	0
606	0	0	0	0	0	0
607	0	0	0	0	0	0
608	0	0	0	0	0	0
609	95	90	80	97	39	61.2
610	2625	2717	2794	2823	2825	2231.8
611	60	37	51	9	38	39.0
612	1	7	2	0	0	2.0
613	0	0	0	0	0	0
614	0	0	0	0	0	0
615	0	0	0	0	0	0
616	0	0	0	0	0	0

**ตารางผนวกที่ 16** ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
3.2 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 3.2 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
644	0	0	0	0	0	0
645	0	0	0	0	0	0
646	0	0	0	0	0	0
647	0	0	0	0	0	0
648	0	0	0	0	0	0
649	0	0	0	0	0	0
650	0	0	0	0	0	0
651	0	0	0	0	0	0
652	57	90	43	55	11	39.8
653	2725	2700	2718	2795	2814	2205.4
654	38	21	38	4	42	28.6
655	11	7	0	0	0	3.6
656	0	0	0	0	0	0
657	0	0	0	0	0	0
658	0	0	0	0	0	0
659	0	0	0	0	0	0

**ตารางผนวกที่ 18** ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
3.4 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 3.4 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
656	0	0	0	0	0	0
657	0	0	0	0	0	0
658	0	0	0	0	0	0
659	0	0	0	0	0	0
660	0	0	0	0	0	0
661	0	0	0	0	0	0
662	0	0	0	0	0	0
663	0	0	0	0	0	0
694	14	14	42	44	38	27.6
695	2795	2798	2811	2787	2873	2253.8
696	15	18	17	47	24	24.2
697	11	7	0	0	0	3.6
698	0	0	0	0	0	0
699	0	0	0	0	0	0
700	0	0	0	0	0	0
701	0	0	0	0	0	0

**ตารางผนวกที่ 18** ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
3.6 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 3.6 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
679	0	0	0	0	0	0
680	0	0	0	0	0	0
681	0	0	0	0	0	0
682	0	0	0	0	0	0
683	0	0	0	0	0	0
684	0	0	0	0	0	0
685	0	0	0	0	0	0
686	0	0	0	0	0	0
687	17	14	11	21	23	13.8
728	2769	2815	2864	2823	2794	2259.2
729	20	16	12	30	14	18.4
690	0	7	2	0	0	1.8
691	0	0	0	0	0	0
692	0	0	0	0	0	0
693	0	0	0	0	0	0
694	0	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ 19 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
3.8 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 3.8 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
756	0	0	0	0	0	0
757	0	0	0	0	0	0
758	0	0	0	0	0	0
759	0	0	0	0	0	0
760	0	0	0	0	0	0
761	0	0	0	0	0	0
762	0	0	0	0	0	0
763	0	0	0	0	0	0
764	45	41	23	19	31	22.8
765	2806	2752	2841	2798	2767	2231.6
766	13	11	7	9	10	10
767	0	7	2	0	0	1.8
768	0	0	0	0	0	0
769	0	0	0	0	0	0
770	0	0	0	0	0	0
771	0	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ 20 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
4.0 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 4.0 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
797	0	0	0	0	0	0
798	0	0	0	0	0	0
799	0	0	0	0	0	0
800	0	0	0	0	0	0
801	0	0	0	0	0	0
802	0	0	0	0	0	0
803	0	0	0	0	0	0
804	1	2	0	0	0	0.4
805	77	81	52	63	68	52.8
806	2774	2795	2841	2878	2801	2263
807	0	0	1	2	7	2
808	0	7	2	0	0	1.8
809	0	0	0	0	0	0
810	0	0	0	0	0	0
811	0	0	0	0	0	0
812	0	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ 21 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
4.2 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 4.2 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
836	0	0	0	0	0	0
837	0	0	0	0	0	0
838	0	0	0	0	0	0
839	0	0	0	0	0	0
840	0	0	0	0	0	0
841	0	0	0	0	0	0
842	0	0	0	0	0	0
843	0	0	1	3	1	1
844	27	24	29	31	25	21.8
845	2745	2714	2801	2739	2782	2207.2
846	17	12	32	28	22	22.2
847	0	7	2	0	0	1.8
848	0	0	0	0	0	0
849	0	0	0	0	0	0
850	0	0	0	0	0	0
851	0	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ 22 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
4.4 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 4.4 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
868	0	0	0	0	0	0
869	0	0	0	0	0	0
870	0	0	0	0	0	0
871	0	0	0	0	0	0
872	0	0	0	0	0	0
873	0	0	0	0	0	0
874	0	0	0	0	0	0
875	0	0	1	3	1	1
876	71	51	62	35	27	35
877	2697	2714	2786	2699	2689	2177.6
878	56	38	46	33	35	41.6
879	0	7	2	0	0	1.8
880	0	0	0	0	0	0
881	0	0	0	0	0	0
882	0	0	0	0	0	0
883	0	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ 23 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
4.6 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 4.6 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
901	0	0	0	0	0	0
902	0	0	0	0	0	0
903	0	0	0	0	0	0
904	0	0	0	0	0	0
905	0	0	0	0	0	0
906	0	0	0	0	0	0
907	0	0	0	0	0	0
908	0	0	1	3	1	1
909	3	1	25	26	20	14.4
910	2840	2796	2771	2803	2784	2230.8
911	14	21	56	47	23	32.2
912	0	7	2	0	0	1.8
913	0	0	0	0	0	0
914	0	0	0	0	0	0
915	0	0	0	0	0	0
916	0	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ 24 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
4.8 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 4.8 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
935	0	0	0	0	0	0
936	0	0	0	0	0	0
937	0	0	0	0	0	0
938	0	0	0	0	0	0
939	0	0	0	0	0	0
940	0	0	0	0	0	0
941	0	0	0	0	0	0
942	0	0	1	3	1	1
943	5	18	23	27	28	19.2
944	2785	2695	2796	2801	2698	2198
945	18	14	36	15	13	19.2
946	0	7	2	0	0	1.8
947	0	0	0	0	0	0
948	0	0	0	0	0	0
949	0	0	0	0	0	0
950	0	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ 25 ผลการเก็บยอดพัลส์ลงตู้ช่องของเครื่อง MCA ชนิดพกพาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
5.0 โวลต์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5.0 โวลต์						
ช่อง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
968	0	0	0	0	0	0
969	0	0	0	0	0	0
970	0	0	0	0	0	0
971	0	0	0	0	0	0
972	0	0	0	0	0	0
973	0	0	0	0	0	0
974	0	0	0	0	0	0
975	0	0	1	3	1	1
976	49	52	41	60	30	36.6
977	2698	2785	2794	2541	2699	2163.8
978	25	38	54	127	29	54.6
979	0	7	2	0	0	1.8
980	0	0	0	0	0	0
981	0	0	0	0	0	0
982	0	0	0	0	0	0
983	0	0	0	0	0	0

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ ธเนศ สุขสมพงษ์

เกิดวันที่ 24 พฤศจิกายน พ.ศ.2525

สถานที่เกิด ต.หนองบ่อ อ.สองพี่น้อง จังหวัดสุพรรณบุรี

ประวัติการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ.วิทยาศาสตร์ทั่วไป)

คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ทุนการศึกษาที่ได้รับ ทุนโครงการสนับสนุนทุนวิจัยด้านความปลอดภัยจากการใช้พลังงานปรมาณู

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ