

**DISERTASI**

**RANCANG-BANGUN SISTEM SPEKTROSKOPI  
RADIASI NUKLIR MULTI-DETEKTOR**

***DESIGN AND CONSTRUCTION OF  
MULTI-DETECTOR NUCLEAR RADIATION SPECTROSCOPY SYSTEM***

**I Ketut Swakarma, Drs. , MT.  
NIM. 01/975/PS**

**PROGRAM STUDI S3 ILMU FISIKA  
JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS GADJAH MADA  
YOGYAKARTA**

**2010**

**DISERTASI**

**RANCANG-BANGUN SISTEM SPEKTROSKOPI  
RADIASI NUKLIR MULTI-DETEKTOR**

***DESIGN AND CONSTRUCTION OF  
MULTI DETECTOR NUCLEAR RADIATION SPECTROSCOPY SYSTEM***

**Disertasi untuk memperoleh derajat  
Doktor dalam Ilmu Fisika pada  
Universitas Gadjah Mada**

**I Ketut Swakarma, Drs. , MT.  
NIM. 01/975/PS**

**PROGRAM STUDI S3 ILMU FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS GADJAH MADA  
YOGYAKARTA**

**2010**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**DISERTASI**

**RANCANG-BANGUN SISTEM SPEKTROSKOPI  
RADIASI NUKLIR MULTI-DETEKTOR**

**I Ketut Swakarma, Drs. , MT.  
NIM. 01/975/PS**

Dipertahankan di hadapan Dewan Penguji Program Studi S3  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Gadjah Mada  
Pada Tanggal .....

**Pravoto, Prof., Dr., Ir., M.Sc.**  
Promotor

**Kusminarto, Prof., Dr.**  
Ko-Promotor

**Gede Bayu Suparta, Drs., Ph.D.**  
Ko-Promotor

## **PERNYATAAN**

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam Disertasi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, April 2010

I Ketut Swakarma, Drs. , MT.

## PRAKATA

Puji syukur kepada Ida Sang Hyang Widhi Wasa, Tuhan Yang Maha Esa, yang telah mengizinkan penulis untuk menyelesaikan Disertasi dengan judul **“Rancang-bangun sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor”**. Disertasi ini disusun sebagai salah satu prasyarat untuk memperoleh derajat gelar Doktor pada Program Studi S-3 Ilmu Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.

Penulis menyadari bahwa dalam pelaksanaan penelitian dan penyusunan disertasi ini berkat bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dekan Fakultas MIPA selaku penanggung jawab program S-3 Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam UGM.
2. Bapak Prayoto, Prof., Dr., Ir., M.Sc. selaku Promotor, yang telah banyak memotivasi selama pembimbingan, penelitian dan penulisan Disertasi ini.
3. Bapak Kusminarto, Prof., Dr. selaku Ko-Promotor, yang telah berkenan meluangkan waktu membimbing penulis selama penelitian, seminar dan penulisan Disertasi ini.
4. Bapak Gede Bayu Suparta, Ph.D. selaku Ko-Promotor, yang telah memberikan dukungan fasilitas sehingga penelitian ini dapat berlangsung serta keleluasaan waktunya untuk pembimbingan, seminar dan penulisan Disertasi ini.
5. Adik-adik Wayan Sutrisna, ST. , Putu Darmayasa, ST. , Wayan Sudirata, ST. dan Nyoman Radiasa, ST. yang telah banyak membantu pembuatan perangkat keras dan perangkat lunak.
6. Rekan-rekan di Laboratorium Grup Riset Fisika Citra Jurusan Fisika FMIPA UGM yaitu: Sdr. Waskito Nugroho, M.Si., Sdr. Susilo, M.Si. , Sdr. Dr. Komang Gde Suastika, M. Si. , Sdr. Dr. Moh. Yasin, M.Si. dan Sdr. Suryono, M.Si.
7. Staf dan karyawan Laboratorium Pengujian Elektronika PTAPB BATAN Yogyakarta yaitu: Sdr. Dra. Dewita Triyono, Sdr. Drs. Setyadi WS. , Sdr.

Juningram dan Sdr. Nugroho, ST.

8. Istriku Sri Mulyati dan anak-anakku I Wayan Pandu S. dan I Made Artha Agastya, yang telah memberikan doa restu dan dengan sabar memberikan dukungan motivasi selama menempuh studi S-3.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan disertasi ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat konstruktif guna penyempurnaan Disertasi ini. Akhir kata, semoga karya ini dapat memberikan manfaat bagi masyarakat pada umumnya dan civitas akademika Universitas Gadjah Mada pada khususnya

Yogyakarta, Februari 2010

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN SETELAH HALAMAN JUDUL .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
SURAT PERNYATAAN .....	iv
PRAKATA .....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR TABEL .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR LAMPIRAN .....	xi
ABSTRAKS .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
BAB I. PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	4
1.3. Batasan Masalah .....	4
1.4. Keaslian Penelitian .....	5
1.5. Tujuan Penelitian .....	6
1.6. Faedah Penelitian .....	7
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA .....	8
BAB III. LANDASAN TEORI .....	10
3.1. Interaksi Radiasi Gamma dengan Materi .....	10
3.1.1. Efek fotolistrik .....	11
3.1.2. Hamburan Compton .....	12
3.1.3. <i>Pair production</i> .....	14
3.2. Sistem spektroskopi nuklir .....	15
3.2. Penganalisa saluran tunggal ( <i>Single Channel Analyzer, SCA</i> ) ...	16
3.3. Sistem komunikasi <i>I2C Bus</i> .....	17
3.4. Master Kontrol .....	18
3.5. Mikrokontroler ( $\mu\text{C}$ ) .....	19
3.6. <i>Digital to analog converter (DAC)</i> .....	20
3.7. Pengkondisi sinyal .....	21
3.8. Uji T berpasangan ( <i>paired</i> ) .....	22
BAB IV. CARA PENELITIAN DAN RANCANG BANGUN .....	23
4.1. Cara Penelitian .....	23
4.1.1. Tempat dan waktu Penelitian .....	23
4.1.2. Bahan Penelitian .....	23
4.1.3. Alat Penelitian .....	23
4.1.4. Proses Penelitian .....	24
4.2. Proses Rancang-bangun .....	25
4.2.1. Sistem Perangkat Keras .....	25
4.2.2. Rangkaian SCA dan Pencacah .....	27
4.2.3. Rangkaian Pengkondisi Sinyal .....	28
4.2.4. Rangkaian Master Kontrol .....	29

4.2.5. Sistem Perangkat Lunak .....	30
4.2.5.a. Sistem Perangkat Lunak untuk Mikrokontroler. ....	30
4.2.5.b. Sistem Perangkat Lunak untuk Akusisi data dan penampil spektrum radiasi .....	33
BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN .....	35
5.1. Pengujian perangkat keras ( <i>hardware</i> ) .....	35
5.1.1. Pengujian pembentuk gelombang .....	35
5.1.2. Pengujian Modul Pengkondisi Sinyal .....	37
5.1.3. Pengujian prototipe SCA .....	39
5.1.4. Pengujian Perangkat Lunak ( <i>Software</i> ) .....	42
5.2. Pengujian Sistem Spektroskopi Radiasi Nuklir Multi-Detektor ...	44
BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN .....	48
6.1. Kesimpulan.....	48
6.2. Saran .....	48
DAFTAR PUSTAKA .....	50
LAMPIRAN-LAMPIRAN .....	
RINGKASAN .....	

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. <i>State of the Art</i> beberapa penelitian tentang spektroskopi <i>nuclear</i> di beberapa Jurnal Internasional .....	6
Tabel 5.1. Hasil uji modul pengkondisi sinyal pada frekuensi tetap 2500 Hz. ..	38
Tabel 5.2. Hasil uji tanggap frekuensi modul pengkondisi sinyal pada tegangan tetap 30 mV .....	39
Tabel 5.3. Hasil pengujian komparasi <i>prototype</i> SCA dengan alat pembanding model 871 Merk ORTEC .....	40
Tabel 5.4. Nilai rata-rata uji tes prototipe SCA dan SCA pembanding ORTEC.....	41
Tabel 5.5. Nilai koefisien korelasi linear untuk keempat SCA .....	47

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Koefisien pelemahan linear .....	10
Gambar 3.2	Skema gejala fotolistrik .....	11
Gambar.3.3	Hamburan Compton .....	12
Gambar 3.4.	Diagram blok sistem spektroskopi nuklir .....	16
Gambar 3.5.	Contoh spektrum hasil spektroskopi gamma .....	16
Gambar 3.6.	Bentuk sinyal masukan dan luaran <i>Single Channel Analyzer</i> .....	17
Gambar 3.7.	Diagram blok sistem komunikasi <i>I2C Bus</i> antar <i>Slave, Master</i> dan <i>PC</i> .....	18
Gambar 3.8.	Transfer data baca dan tulis antara <i>Master</i> dan <i>slave</i> .....	18
Gambar 3.9.	Kondisi sinyal <i>start</i> dan <i>stop</i> pada komunikasi <i>I2C Bus</i> .....	19
Gambar 3.10.	Diagram blok <i>downloader</i> atau pengisian program ke dalam chip IC $\mu\text{C}$ .....	20
Gambar 3.11.	Skematik rangkaian dasar DAC .....	21
Gambar 4.1.	Sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor .....	26
Gambar 4.2.	Diagram blok sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor yang direalisasikan .....	27
Gambar 4.3.	Diagram blok SCA .....	28
Gambar 4.4.	Diagram alir perangkat lunak pada master kontrol .....	31
Gambar 4.5.	Diagram alir perangkat lunak pada SCA .....	32
Gambar 4.6.	Diagram alir perangkat lunak akuisisi data dan penampil spektrum radiasi nuklir .....	34
Gambar 5.1.	Skematik rangkaian pembentuk gelombang .....	36
Gambar 5.2.	Diagram blok pengujian pembentuk gelombang .....	36
Gambar 5.3.	Hasil pengujian bentuk gelombang luaran (a) bentuk luaran langsung dari Detektor (b) bentuk luaran dari pengkondisi sinyal.	37
Gambar 5.4.	Diagram blok pengujian modul pengkondisi sinyal .....	38
Gambar 5.5.	Diagram blok pengujian prototipe SCA .....	40
Gambar 5.6.	Tampilan luaran uji T berpasangan ( <i>paired</i> ) .....	41
Gambar 5.7.	Tampilan program akuisisi data Borland Delphi 6.0 .....	43
Gambar 5.8.	Contoh spektrum radiasi nuklir Cs-137, hasil dari pengujian perangkat lunak .....	44
Gambar 5.10.	Blok diagram pengujian sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor .....	46
Gambar 5.11.	Tampilan hasil pengujian spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor .....	46
Gambar 5.12.	Spektrum radiasi nuklir multidetektor .....	48

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. Skematik rangkaian single channel analyzer (sca) .....	65
Lampiran B. Skematik rangkaian pengkondisi sinyal .....	66
Lampiran C.1. Tabel hasil cacahan ( <i>counting</i> ) SCA1 .....	67
Lampiran C.2. Tabel hasil cacahan ( <i>counting</i> ) SCA2 .....	69
Lampiran C.3. Tabel hasil cacahan ( <i>counting</i> ) SCA3 .....	71
Lampiran C.4. Tabel hasil cacahan ( <i>counting</i> ) SCA4 .....	73
Lampiran D.1. Layout PCB Layer Atas Multi-SCA .....	75
Lampiran D.2. Layout PCB Layer Bawah Multi-SCA .....	76
Lampiran D.3. Tataletak Komponen Multi-SCA .....	77
Lampiran E.1. Layout PCB Layer Atas Master Kontrol SCA .....	78
Lampiran E.2. Tataletak Komponen Master Kontrol SCA .....	78
Lampiran F.1. Listing program assembler master kontrol .....	79
Lampiran F.2. Listing program assembler slave (SCA) .....	89
Lampiran G.1. Listing Program Project spektroskopi .....	103
Lampiran G.2. Listing program Unit spektroskopi .....	104
Lampiran G.3. Listing program Unit Thread .....	109
Lampiran H.1. Data sheets mikrokontroler ATtiny 2313 .....	115
Lampiran H.2. Data sheets DAC 7611 .....	136
Lampiran H.3. Data sheets Op-Amp LM139 .....	154
Lampiran H.4. Data sheets Op-Amp OPA227 .....	181

# RANCANG-BANGUN SISTEM MULTI-DETEKTOR UNTUK SPEKTROSKOPI RADIASI NUKLIR

I Ketut Swakarma  
NIM. 01/975/PS

## ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian tentang rancang-bangun sistem spektroskopi radiasi nuklir berbasis multi-detektor. Sistem spektroskopi digunakan untuk mendapatkan spektrum energi dan menentukan energi puncak (*peak energy*) suatu sumber radiasi nuklir. Model sistem multi-detektor ini berupa suatu paket yang terdiri atas 4 (empat) buah *Single Channel Analyzer* (SCA), 4 (empat) buah pencacah (*counter*), 4 (empat) buah pengkondisi sinyal, master kontrol, sistem komunikasi data serial *Inter Integrated Circuit* (I2C) bus dan sebuah komputer (*Notebook*). Ke-empat SCA masing-masing disebut *Slave1*, *Slave2*, *Slave3* dan *Slave4*. Data hasil cacahan oleh masing-masing SCA (*Slave*) dibaca secara bergantian oleh master kontrol melalui sistem komunikasi data serial I2C bus. Data dari masing-masing SCA ini selanjutnya dikirim ke komputer oleh master kontrol melalui sistem komunikasi port serial (port com). Sistem telah diuji menggunakan sebuah sumber radiasi gamma Cs-137 ( $E_{\gamma}=662$  keV,  $T_{1/2}=30$  th) dan sebuah detektor nuklir NaI(Tl) yang dilengkapi dengan *Photomultiplier Tube* (PMT). Keluaran detektor ditandem secara paralel menjadi empat keluaran yang sama persis. Spektrum yang ditanggapi oleh keempat SCA menunjukkan kemiripan yang sangat signifikan dilihat dari hasil uji koefisien korelasi yaitu berkisar antara 0.98-0.99 terhadap salah satu spektrum yang dirujuk sebagai acuan. Dengan sistem multi-detektor untuk spektroskopi radiasi nuklir diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai komponen utama suatu sistem tomografi komputer (TK) multi-detektor.

*Kata-kata kunci:* Spektroskopi, multi-detektor, radiasi nuklir

# DESIGN AND CONSTRUCTION OF MULTI-DETECTOR NUCLEAR RADIATION SPECTROSCOPY SYSTEM

I Ketut Swakarma  
NIM. 01/975/PS

## ABSTRACT

System design on multi-detector system for nuclear radiation spectroscopy has been done. Spectroscopy system was used for obtaining energy spectrum and determining the peak energy of a nuclear radiation source. The model of the multi-detector system comprised of 4 units Single Channel Analyzer (SCA), 4 units counters, 4 units signals conditioner, a control master and a notebook. All SCA consecutively were identified as *Slave1*, *Slave2*, *Slave3* and *Slave4*. The data acquired by each SCA (*Slave*) was read consecutively by a control master using a serial data communication I2C bus. All data from each SCA were sent to computer by the control master through the serial port. The system has been tested using the gamma radiation Cs-137 ( $E_\gamma=662$  keV,  $T_{1/2}=30$  yr) and a single NaI(Tl) detector along with its *Photomultiplier Tube* (PMT). The output of the detector was tandemed in parallel way to obtain four similar outputs. The spectroscopy results showed that all spectrums obtained have great compromise to the one that was assumed as the reference, with a correlation coefficient of 0.98-0.99. This result may be used for CT development that is based on multi-detector.

*Keywords:* Spectroscopy, multi-detector, nuclear radiation

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

Teknik Tomografi Komputer (TK) atau *Computed Tomography (CT)* sudah umum digunakan dalam bidang kedokteran untuk membuat citra struktur internal atau tampak lintang tubuh pasien secara *non-invasive* yang memperlihatkan kelainan anatomi tubuh pasien (Delchar, 1997). Berbagai perangkat diagnosis berbasis TK yang menggunakan sinar-x dan berbagai radiasi nuklir sudah banyak digunakan di berbagai rumah sakit di Indonesia. *Whole Body CT Scanner* yang menggunakan sinar-x telah digunakan untuk pencitraan anatomi tubuh secara keseluruhan. *Positron Emission Tomography (PET)* yang menggunakan positron dan menghasilkan pasangan radiasi gamma digunakan untuk pencitraan fungsional metabolik. *Single Photon Emission Tomography (SPECT)* yang menggunakan radiofarmaka pemancar radiasi gamma digunakan untuk pencitraan fungsional. Semua sistem tersebut menggunakan suatu sistem multi-detektor untuk mendeteksi radiasi nuklir yang digunakan. Jumlah detektor yang digunakan dapat lebih dari seratus detektor.

Alat pencitraan medis yang lain seperti Kamera gamma (*Gamma Camera*) yang mendeteksi radiasi nuklir gamma untuk pencitraan fisiologi seperti pada kelenjar gondok dan ginjal juga memerlukan sistem multi-detektor dimana jumlah detektornya antara 30 – 80 detektor. Disamping itu beberapa alat medis seperti *Thyroid Uptake* dan *Renograph* juga digunakan untuk mengetahui distribusi radiofarmaka di dalam tubuh pasien sebagai bentuk yang lebih sederhana dari pada kamera gamma. Kedua alat tersebut secara prinsip memerlukan 2-4 detektor agar diperoleh data yang baik tentang kondisi pasien.

Jurusan Fisika FMIPA UGM telah mengembangkan studi dan penelitian di bidang TK generasi pertama atau sistem TK translasi-rotasi (Suparta *dkk*, 2000; Widodo *dkk*, 2000; Suparta, 2000; Widyatmika, 2003). Sistem TK ini menggunakan sebuah sumber radiasi nuklir titik (*pencil beam*) dan sebuah detektor nuklir yang sesuai. Sumber radiasi nuklir yang digunakan biasanya

adalah Cs-137 (3  $\mu\text{Ci}$ ) atau I-131 (5  $\mu\text{Ci}$ ) yang secara umum aktivitas nuklir sumber tersebut sangat kecil. Sistem TK tersebut memerlukan banyak gerak translasi dan rotasi secara mekanik dan pada setiap posisi tersebut dilakukan proses pencacahan radiasi nuklir. Karena sistem ini banyak memerlukan gerakan mekanik untuk mendefinisikan posisi, unjuk-kerja alat tersebut amat lambat, yaitu antara 3-22 jam untuk satu proses pemayaran dari sebuah tampang lintang obyek. Variasi waktu tersebut tergantung pada resolusi data sinogram yang diinginkan. Proses pemayaran dapat dipercepat dengan cara meningkatkan aktivitas isotop radiasi pemancar gamma dan mereduksi waktu pencuplikan data. Namun, upaya memperoleh isotop beraktivitas lebih tinggi relatif sangat sulit karena harus memenuhi sejumlah persyaratan yang tidak mungkin dipenuhi oleh Lab. Grup Riset Fisika Citra jurusan Fisika FMIPA UGM. Harapan untuk mempercepat proses pemayaran yang paling mungkin adalah dengan mengembangkan sistem tomografi komputer berbasis multi-detektor, walaupun untuk itu diperlukan biaya yang tidak sedikit. Sistem TK tersebut dapat disusun menggunakan radiasi berkas kipas dan multi-detektor seperti yang telah dikembangkan oleh Rahim *et al.* (2008). Namun, sistem ini masih memiliki masalah yaitu berkaitan dengan adanya perbedaan kinerja antar detektor sehingga kualitas citra TK yang dihasilkan buruk.

Pada setiap peralatan yang memerlukan proses deteksi nuklir terdapat perangkat berupa perangkat *Single Channel Analyzer (SCA)*. SCA merupakan piranti elektronik yang sangat penting untuk menentukan karakteristik energi radiasi, intensitas radiasi dan spektrum energi radiasi suatu isotop. SCA memerlukan sinyal masukan dari keluaran detektor. Selanjutnya sinyal tersebut diproses dan dipisahkan berdasarkan prinsip filter jendela sehingga diperoleh cacah radiasi untuk jendela tertentu. Lebar jendela (*window*) pada kanal energi yang digunakan dapat diatur sesuai kebutuhan. Pulsa-pulsa listrik itu mewakili energi radiasi nuklir yang digunakan (ORTEC, 1976). Sistem yang menggunakan single-SCA telah dibuat oleh Suparta (1999), Suparta dkk (2000), Widyatmika (2003), Wang (2003) dan Nugroho (2004).

Oleh karena itu, suatu upaya yang bertujuan untuk mengatasi masalah lambatnya kinerja sistem TK dan perbedaan kinerja antar detektor sangat menarik

dikembangkan. Disamping itu kinerja beberapa peralatan medis berbasis spektroskopi seperti Thyroid Uptake dan Renograph, serta peralatan spektroskopi radiasi nuklir sangat mungkin ditingkatkan bila digunakan sistem multi-detektor yang memiliki kinerja seragam. Berdasarkan kemajuan teknologi yang ada, upaya tersebut sangat dimungkinkan karena tersedianya teknologi mikrokontroler dan komunikasi data *Inter Integrated Circuit* (I2C). Rancang bangun sistem TK yang menggunakan I2C dan mikrokontroler sangat mungkin mempercepat kinerja sistem TK multi-detektor karena tanpa proses multi-plexing.

Sistem multi-detektor cenderung memiliki kelemahan fundamental yang berasal dari perbedaan detektor itu sendiri. Perbedaan kinerja ini disebabkan oleh tabung detektor, bahan sintilator, tebal sintilator, perbedaan sifat komponen elektronik, stabilitas komponen dan tegangan kerja detektor. Perbedaan kinerja ini adalah alamiah yang sangat sulit dikendalikan. Kinerja setiap detektor tidak dapat dibuat seragam secara persis sehingga diperlukan adanya multi SCA yang dapat melakukan kompensasi atas perbedaan kinerja antar detektor pada sistem multi-detektor tersebut. Karena itu, untuk mengantisipasi perbedaan kinerja dari masing-masing detektor maka dapat dilakukan proses pengaturan pada setiap SCA yang terhubung pada masing-masing detektor. Agar proses pengaturan menghasilkan hasil baik, proses pengaturan juga dapat dilakukan pada bagian penguat pre-amplifier (pre-Amp), amplifier (Amp), pengkondisi sinyal dan pembentuk gelombang sedemikian hingga pada akhirnya keluaran semua detektor yang berbeda-beda dapat diatur agar memberikan kinerja sistem deteksi yang serupa, bahkan sama.

Unit detektor, pre-Amp, Amp, pengkondisi sinyal, pembentuk gelombang, SCA, *counter* dan *timer* untuk keperluan pembuatan suatu *CT scanner* dapat dibeli di pasar internasional. Namun, harganya yang cenderung sangat mahal mendorong perlunya penelitian tentang pengembangan rancang-bangun sistem multi-detektor sendiri yang lebih ekonomis dan menggunakan komponen-komponen yang mudah tersedia di pasar domestik, namun tetap memenuhi ketentuan fisis standar dan tetap mengakomodasi proses dan prinsip fisika yang benar.

Dalam disertasi ini hendak ditunjukkan upaya dan proses rancang-bangun suatu sistem multi-detektor untuk spektroskopi radiasi nuklir. Bila kinerja sistem multi-detektor itu baik, maka sistem multi-detektor itu diharapkan kelak dapat digunakan untuk mendukung pembuatan suatu perangkat TK seperti CTScanner buatan Indonesia. Sistem multi-detektor juga dapat digunakan untuk mendukung teknologi diagnostik renograph, thyroid uptake maupun gamma camera yang saat ini sebenarnya sangat dibutuhkan oleh berbagai rumah sakit di Indonesia. Ketersediaan alat-alat diagnostik seperti itu relatif langka karena harganya yang sangat mahal.

## **1.2. Perumusan Masalah**

Mengacu pada latar belakang permasalahan tersebut di atas, perumusan masalah dalam penelitian ini disusun sebagai berikut.

- a) Bagaimanakah rancang-bangun dari suatu sistem multi-detektor yang dapat digunakan untuk melakukan proses spektroskopi radiasi nuklir, yang potensial digunakan untuk mendukung suatu sistem tomografi komputer, Thyroid Uptake, Renograph, dan spektroskopi multi-radiasi nuklir?
- b) Bagaimanakah luaran profil spektrum spektroskopi sumber radiasi yang dideteksi menggunakan sistem multi-detektor ini?
- c) Bagaimanakah luaran profil spektrum spektroskopi yang dihasilkan dari sistem yang dibuat relatif terhadap pola spektrum spektroskopi yang dihasilkan oleh suatu SCA pembanding yang biasa dipakai (SCA buatan ORTEC)?

## **1.3. Batasan Masalah**

Batasan masalah agar penelitian ini lebih fokus diuraikan sebagai berikut.

- a) Sistem multi-detektor yang dirancang-bangun hanya untuk 4 detektor, karena keterbatasan fasilitas. Karena itu hanya diperlukan 4 buah SCA yang diharapkan harus memiliki kinerja yang sama.
- b) Untuk menguji kinerja keempat SCA digunakan satu detektor gamma NaI(Tl) BICRON model 212/2P yang ditandem secara paralel sebanyak empat kali

sehingga diperoleh empat keluaran yang memiliki kualitas sama.

- c) Pengujian sistem empat SCA dilakukan menggunakan sumber radiasi gamma Cs-137 ( $E_\gamma=662$  keV,  $T_{1/2}=30,2$  th) dengan aktivitas sekitar  $3 \mu\text{Ci}$ .
- d) Penelitian ini belum mencakup kinerja sistem untuk aplikasi sesungguhnya yaitu menggunakan jumlah detektor dan SCA yang sama.

#### 1.4. Keaslian Penelitian

Penelitian tentang Rancang-Bangun Sistem Spektroskopi Radiasi Nuklir Multi-Detektor ini dapat dikatakan baru karena beberapa hal sebagai berikut. Umumnya peralatan spektroskopi terdiri atas sebuah *Single Channel Analyzer* dengan sebuah detektor yang sesuai dengan jenis radiasi nuklir yang digunakan. Disamping itu, sistem deteksi berbasis SCA yang umumnya ada berupa sistem modular, yang terdiri atas modul-modul pre-Amp, Amp, SCA, counter dan timer. Penelitian dalam disertasi ini merancang-bangun suatu perangkat yang menggabungkan semua modul itu menjadi satu *board* PCB.

Perangkat spektroskopi yang dirancang-bangun dalam penelitian ini mulai menggunakan chip IC mikrokontroler ( $\mu\text{C}$ ) untuk pengendalian proses spektroskopi radiasi nuklir dan sistem komunikasi data serial berbasis I2C bus (*Inter Integrated Circuit bus*) sehingga proses akuisisi data secara keseluruhan tanpa menggunakan mekanisme *multi-plexing* melainkan berlangsung secara serempak (simultan).

Dengan demikian melalui penelitian rancang-bangun ini diperoleh suatu sistem spektroskopi radiasi nuklir untuk multi-detektor yang menggunakan sistem multi-SCA yang kompak, yang proses kendalinya berbasis mikrokontroler, yang bekerja secara simultan sehingga proses akuisisi data yang menggunakan multi-detektor dapat dipercepat secara signifikan. Percepatan proses demikian dimungkinkan juga karena sistem spektroskopi ini tanpa melalui proses konversi data menggunakan *Analog to Digital Converter* (ADC)

Sebagai pembandingan kebaruan dalam penelitian ini berikut ditunjukkan Tabel 1.1 yang menyajikan *state of the art* beberapa penelitian yang telah dipublikasikan di beberapa jurnal internasional berikut.

Tabel 1.1. *State of the Art* beberapa penelitian tentang spektroskopi *nuclear* di beberapa Jurnal Internasional.

No.	Referensi	Judul Paper	Keterangan
1.	Al-Haddad et al (1994)	Development and Testing of a Flash Analog-to-Digital Converter Based System for Pulse Shape Discriminator of Nuclear Radiation Pulse	Penelitian ini masih menggunakan ADC 10-bit walaupun itu sudah termasuk ADC yang cepat. Namun karena masih memerlukan proses konversi data maka waktu proses keseluruhan masih tetap relative lambat.
2.	Lund <i>et al</i> (1998)	Gamma-ray imaging and spectroscopy system using room-temperature semiconductor detector elements	Penelitian ini bermaksud mencari energi puncak radiasi nuklir menggunakan ADC sehingga diperlukan proses konversi data yang akhirnya memperlambat proses spektroskopi dan pencitraan.
3.	Hien and Senzaki (2001)	Development of a fast 12-bit ADC for a nuclear spectroscopy system	Penelitian ini tetap masih menghasilkan proses spektroskopi yang masih tetap lambat walaupun telah menggunakan ADC 12-bit.
4.	Treede <i>et al</i> (2002)	Multidetector computed tomography (MDCT) in coronary surgery: first experiences with a new tool for diagnosis of coronary artery disease	Penelitian ini menguraikan penggunaan multi-detektor untuk sistem TK helical scanning namun akurasinya masih rendah ketika digunakan untuk diagnosa kasus aliran dinamik seperti penyakit jantung koroner.
5.	Farsoni and Hamby (2007)	A system for simultaneous beta and gamma spectroscopy	Penelitian ini menggunakan sebuah detector tiga lapis yang masing lapis dapat mendeteksi jenis radiasi tertentu. Namun memiliki kelemahan yaitu masih ada interferensi antar spectrum dan secara umum hanya cocok untuk radiasi beta dan radiasi gamma energi rendah.
6.	Swakarma	Rancang-Bangun Sistem Multi-Detektor Untuk Spektroskopi Radiasi Nuklir	Terdiri dari banyak SCA, terintegrasi dalam satu board PCB, berbasis mikrokontroler, dan bekerja secara simultan.

### 1.5. Tujuan Penelitian

Penelitian ini secara umum bertujuan :

- a) merancang suatu sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor beserta sistem akuisisi datanya.
- b) merancang-bangun suatu sistem akuisisi data yang kompak yang terdiri dari

Pre-Amp, pengkondisi sinyal, SCA, counter dan perangkat lunak untuk mikrokontroler dan proses akuisisi data.

- c) mengamati profil luaran sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor yang dihasilkan dari setiap detektor beserta sistem deteksinya.
- d) membandingkan kinerja sistem spektroskopi yang dirancang-bangun ini relatif terhadap spektrum spektroskopi yang dihasilkan dari suatu alat spektroskopi yang umum dipakai seperti alat spektroskopi buatan ORTEC.

#### **1.6. Faedah yang diharapkan**

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat berupa:

- a) diperolehnya prototipe sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor yang dapat dikembangkan lebih lanjut untuk penelitian dan pengembangan teknologi seperti TK *single energy* dan *multi-energy*, SPECT, PET, Thyroid Uptake, Renograph dan sistem spektroskopi berbasis radiasi nuklir secara umum.
- b) diperolehnya pengetahuan baru tentang model sistem spektroskopi yang dapat dikembangkan dan dibuat untuk mendukung kegiatan praktikum yang berhubungan dengan proses spektroskopi radiasi nuklir.
- c) diperolehnya suatu teknologi untuk aplikasi medis maupun industri yang relatif murah dan dapat dibuat menggunakan komponen-komponen yang dapat diperoleh di pasar domestik dan dikerjakan di dalam negeri sehingga apabila peralatan seperti itu diperlukan maka negara dapat menghemat devisa yang sangat signifikan untuk pengadaannya.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

Tomografi adalah suatu teknik pencitraan untuk menghasilkan citra tampak lintang atau struktur internal suatu obyek dengan memanfaatkan foton atau partikel yang dapat menembus obyek. Foton yang telah melewati obyek ditangkap oleh suatu sistem deteksi minimal menggunakan satu detektor dan diambil dari berbagai sudut pandang. Data-data foton hasil tangkapan relatif terhadap foton sebelum menembus obyek digunakan sebagai dasar untuk proses rekonstruksi citra tomografi (Suparta, 1999).

Tomografi yang paling sederhana adalah menggunakan satu detektor saja (Wells *et al*, 1997). Dengan sebuah detektor berarti diperlukan satu sistem deteksi. Salah satu landasan untuk memahami proses deteksi foton untuk tomografi ini adalah sistem spektroskopi nuklir (Swakarma dan suparta, 2005).

Ada beberapa cara lain untuk membangun suatu sistem deteksi dan spektroskopi nuklir. Sistem deteksi dan spektroskopi nuklir yang standard telah banyak dikenal dan digunakan sebagai modalitas penunjang praktikum Fisika nuklir (ORTEC, 1976). Namun perkembangan teknologi yang semakin canggih mendorong lahirnya teknologi-teknologi yang lebih baru, termasuk untuk bidang teknologi spektroskopi nuklir.

Al-Haddad *et al* (1994) telah mengembangkan spektroskopi nuklir dengan teknik pergeseran skala dan menggunakan ADC 10 bit (1024 kanal). Proses ini memerlukan proses konversi sinyal radiasi menjadi pulsa digital sehingga proses deteksi secara keseluruhan menjadi lama.

Hien and Senzaki (2001) menyempurnakan sistem spektroskopi berbasis ADC 10 bit dengan ADC 12 bit. Akibatnya proses spektroskopi menjadi semakin lama karena waktu konversi (*conversion time*) lebih lama, walaupun resolusi spektrum yang dihasilkan menjadi lebih baik yaitu 4096 kanal.

Suatu sistem spektroskopi dan pencitraan gamma berbasis detektor semikonduktor telah dikembangkan (Lund *et al*, 1998). Sistem spektroskopi tersebut menggunakan detektor semikonduktor yang dapat bekerja pada suhu

kamar. Sistem tersebut melakukan proses spektroskopi melalui proses konversi menggunakan ADC, sehingga proses spektroskopi secara keseluruhan tetap lama.

Usaha membangun suatu sistem spektroskopi simultan untuk beberapa jenis radiasi nuklir telah dibangun. Farsoni and Hamby (2007) telah mengembangkan suatu sistem spektroskopi beta dan gamma menggunakan *triple layer phoswich detector* dan suatu pemroses pulsa digital buatan sendiri. Namun spektrum beta dan gamma yang dihasilkan masih buruk dan hanya cocok untuk radiasi beta dan gamma berenergi rendah.

Suatu sistem tomografi komputer moderen memerlukan banyak detektor seperti misalnya pada sistem multi-detektor CT (MDCT) untuk pembedahan koroner (Treede *et al*, 2002). Sistem MDCT sudah umum muncul pada sistem *helical CT Scanning* sehingga akurasi data dan citra hasil relatif sangat rendah.

Riset tentang spektroskopi nuklir telah dibangun secara bertahap pada grup riset Fisika Citra FMIPA UGM (Sapuan, 2004). Sistem tersebut merupakan suatu sistem analog namun dapat digandeng dengan suatu sistem pencacah digital. Akibatnya komputer menjadi terbebani oleh beban kerja yang tinggi. Usaha penyempurnaan telah dilakukan (Swakarma, 2005). Dengan sistem yang dibuat telah dilakukan uji karakterisasi (Jiwatami, 2008; Dewi, 2008).

Penelitian ini dikembangkan untuk merancang bangun suatu sistem spektroskopi nuklir multi detektor yang bekerja tanpa menggunakan ADC. Jika tanpa menggunakan ADC maka yang dilakukan adalah suatu proses membandingkan tinggi sinyal masukan dengan suatu sinyal referensi, lalu mengelompokkan ke dalam suatu sinyal-sinyal yang termasuk dalam jangkauan tinggi tertentu (window energi). Jangkauan tinggi sinyal energi dinyatakan oleh *lower level discriminator* (LLD) dan *upper level discriminator* (ULD). Jika dengan ADC diperlukan suatu proses konversi sinyal data digital sehingga prosesnya menjadi lama.

Sistem multi-detektor banyak digunakan pada perangkat CT Scanner generasi moderen. Disamping itu penelitian dikembangkan untuk keperluan menangani berbagai sumber radiasi nuklir yang berbeda dan menangani kasus untuk sistem *dual energy CT Scanner* (Suastika, 2009).

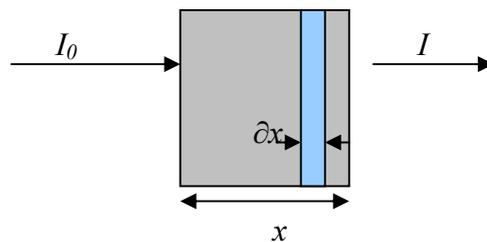
### BAB III

#### LANDASAN TEORI

#### 3.1. Interaksi Radiasi Gamma dengan Materi

Proses spektroskopi berkaitan dengan proses deteksi interaksi radiasi nuklir dengan materi. Secara khusus, ada tiga macam interaksi radiasi gamma dengan materi yaitu efek fotolistrik, hamburan *compton* dan *pair production*. Akibat proses interaksi radiasi gamma dengan materi terjadilah peristiwa pelemahan intensitas radiasi yaitu adanya penyerapan intensitas radiasi oleh bahan. Proses pelemahan intensitas radiasi setelah radiasi itu melewati obyek dapat dijelaskan sebagai berikut.

Diasumsikan suatu bahan setebal  $x$ . Bila suatu intensitas radiasi  $I_0$  dikenakan pada bahan tersebut maka setelah melewati bahan tersebut intensitasnya akan melemah menjadi  $I$  dimana  $I < I_0$ . Dikatakan peristiwa pelemahan radiasi ini adalah akibat penyerapan atau hamburan energi gamma oleh elektron dalam materi. Proses pelemahan secara skematis dapat diamati seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Koefisien pelemahan linear

Berdasarkan Gambar 3.1. tersebut tampak bila bahan setebal  $\partial x$  dikenai radiasi dengan intensitas  $I$  maka terdapat relasi seperti persamaan 3.1.

$$-\frac{\partial I}{I} = \mu \partial x \quad (3.1)$$

dengan  $\mu$  adalah nilai koefisien pelemahan linear,  $\partial I$  adalah intensitas radiasi yang diserap bahan.

Persamaan (3.1) di atas merupakan persamaan tidak gayut waktu. Untuk memperoleh hubungan antara intensitas yang ditransmisikan oleh bahan dan koefisien pelemahan linear, dilakukan dengan mengintegrasikan kedua ruas pada persamaan (3.1) itu, sehingga diperoleh persamaan (3.2). Hal ini menunjukkan bahwa intensitas radiasi melemah secara eksponensial setelah melewati bahan (Beiser, 1987).

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.2)$$

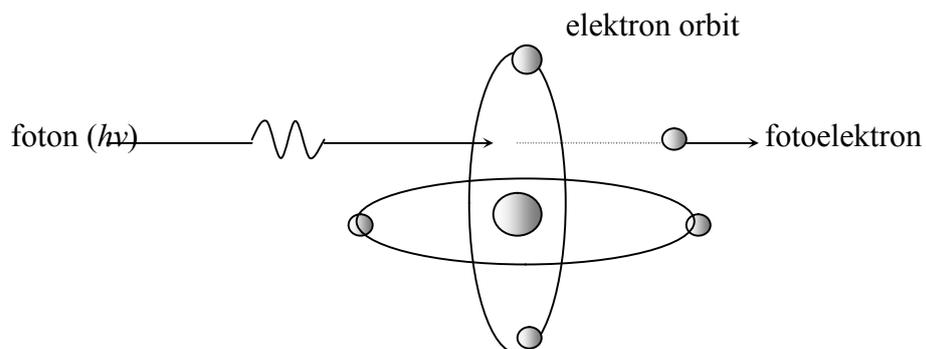
Berikut ini dijelaskan beberapa macam interaksi radiasi dengan materi.

### 3.1.1. Efek fotolistrik

Efek fotolistrik terjadi pada saat radiasi gamma dengan frekuensi yang tinggi (energi tinggi) menumbuk atom sehingga mampu menyebabkan elektron terlepas dari atomnya. Perpindahan elektron terjadi apabila energi radiasi gamma ( $h\nu$ ) yang datang lebih besar dari pada energi ikat elektron dalam atom. Energi ikat ini disebut dengan fungsi kerja ( $W$ ), yang mana untuk tiap jenis atom nilainya berbeda-beda. Nilai fungsi kerja ini merupakan nilai karakteristik untuk setiap atom. Apabila terdapat kelebihan energi, maka kelebihan energi tersebut akan digunakan sebagai energi kinetik elektron ( $E_k$ ) sesuai dengan persamaan berikut (Beiser, 1987):

$$h\nu = W + E_k \quad (3.3)$$

dengan  $h\nu$  adalah energi radiasi gamma,  $h$  adalah tetapan Planck dan  $\nu$  adalah frekuensi cahaya. Efek fotolistrik dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.2.** Skema gejala Fotolistrik

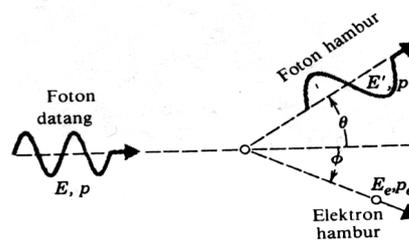
Menurut Susetyo (1988) foton yang mengalami efek fotolistrik dalam interaksinya dengan detektor akan menyerahkan seluruh energinya pada elektron kulit K dari atom-atom penyusun detektor. Misalkan energi foton yang mengalami efek fotolistrik adalah  $E_0$  keV, maka setelah foton tersebut diserap oleh elektron detektor, elektron-elektron tersebut dialirkan menjadi pulsa-pulsa listrik yang tingginya sebanding dengan  $E_0$ . Bila proses interaksi ini terjadi ketika proses spektroskopi maka pulsa-pulsa listrik itu akan membentuk puncak fotolistrik atau *photopeak*.

### 3.1.2. Hamburan Compton

Hamburan Compton adalah gejala yang timbul dalam proses interaksi antara foton dengan elektron bebas atau dengan elektron yang tidak terikat secara kuat pada atomnya. Proses ini menghasilkan foton hamburan dengan energi lebih rendah dari foton datang ( $h\nu$ ) dan elektron Compton yang berpindah dengan energi tertentu. Dalam hal ini, foton gamma hanya menyerahkan sebagian tenaganya pada elektron menjadi  $h\nu'$  dan kemudian elektron terhambur menurut sudut  $\theta$  terhadap arah gerak foton gamma mula-mula. Energi kinetik elektron  $E_k$  menjadi

$$E_k = h\nu - h\nu' \quad (3.4)$$

Efek Compton dapat diilustrasikan seperti terlihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Hamburan Compton

Pada awal tahun 1920 Arthur H. Compton berhasil mengamati fenomena hamburan ini dimana panjang gelombang foton hamburan lebih panjang dari foton datang. Perbedaan panjang gelombang ini ditandai dengan suatu nilai  $h/m_0c$

yang dikenal sebagai panjang gelombang Compton (Beiser, 1987). Dengan menyelesaikan persamaan (3.4) dapat diperoleh persamaan (3.5).

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \quad (3.5)$$

dengan  $\lambda'$  adalah panjang gelombang foton setelah tumbukan dengan elektron target,  $\lambda$  adalah panjang gelombang foton datang,  $m_0$  adalah massa diam partikel dan  $c$  kecepatan cahaya di ruang hampa.

Pada hamburan Compton energi foton akan diserahkan sebagian kepada elektron Compton. Elektron Compton mempunyai energi sebesar (Susetyo, 1988):

$$E_e = E_0 \left( \frac{\left( \frac{E_0}{m_0 c^2} \right) (1 - \cos \theta)}{1 + \left( \frac{E_0}{m_0 c^2} \right) (1 - \cos \theta)} \right) \quad (3.6)$$

Energi elektron Compton dapat bergerak dari  $\theta = 0$  sampai ke suatu energi maksimum untuk  $\theta = \pi$ , yaitu:

$$E_e(\text{maks}) = \frac{E_0}{1 + \frac{m_0 c^2}{2E_0}} \quad (3.7)$$

Bila gejala efek Compton ini diamati secara spektroskopi maka pada spektrum ditunjukkan suatu agihan Compton yang terbentang dari tenaga nol sampai suatu tenaga maksimum  $E_e(\text{maks})$ . Batas maksimum sering disebut tepi Compton. Jika foton terhambur tersebut berinteraksi lebih lanjut dengan detektor dan lalu menghasilkan elektron Compton dengan tenaga  $E'_e$ , maka timbul pulsa yang tingginya setara dengan  $E_e + E'_e$ .

Menurut Susetyo (1988) selain berinteraksi dengan detektor, foton juga dapat berinteraksi dengan elektron-elektron pada atom-atom perisai. Foton yang terhambur akibat berinteraksi dengan perisai ini juga dapat dideteksi oleh detektor. Hamburan tersebut umumnya terjadi pada sudut  $\theta$  besar. Jika  $\theta = 180^\circ$  maka pada spektrum akan tampak puncak kecil yang menumpang di atas agihan Compton. Puncak ini disebut dengan puncak hamburan balik.

Di antara puncak-puncak *photopeak*, tepi Compton dan hamburan balik didapat hubungan seperti persamaan (3.8) berikut.

$$E_{photopeak} = E_{tepi\ Compton} + E_{hamburan\ balik} \quad (3.8)$$

### 3.1.3. *Pair production*

*Pair production* terjadi di dalam inti saat materi dikenai oleh foton dengan tenaga 1022 keV. Dalam hal ini ketika foton melewati medan inti, foton menjelma menjadi sepasang elektron dan positron (elektron positif) (Beiser, 1987). Jumlahan muatan elektron dan positron adalah nol. Energi total, termasuk energi massa dari elektron dan positron sama dengan energi foton. Momentum linear kekal karena pertolongan inti yang mengambil cukup banyak momentum radiasi gamma supaya proses itu terjadi. Tetapi, karena massa elektron dan positron relatif sangat besar, inti hanya menyerap bagian energi radiasi gamma yang dapat diabaikan.

Elektron akan segera menyerahkan energinya kepada detektor sedangkan positron akan bergabung dengan elektron lainnya. Pada saat positron bergabung dengan elektron terjadi proses pemusnahan. Sebagai penggantinya dihasilkan dua foton yang memancar bertolak belakang dan masing-masing mempunyai energi sebesar 511 keV. Kedua foton akan berinteraksi dengan detektor melalui proses fotolistrik maupun hamburan Compton (Susetyo, 1988).

Jika terjadi efek fotolistrik, hamburan Compton dan *pair production*, maka koefisien serapan ( $\mu$ ) merupakan hasil jumlahan dari ketiga proses tersebut sesuai dengan persamaan (3.9) yaitu:

$$\mu_{total} = \mu_F + \mu_C + \mu_P \quad (3.9)$$

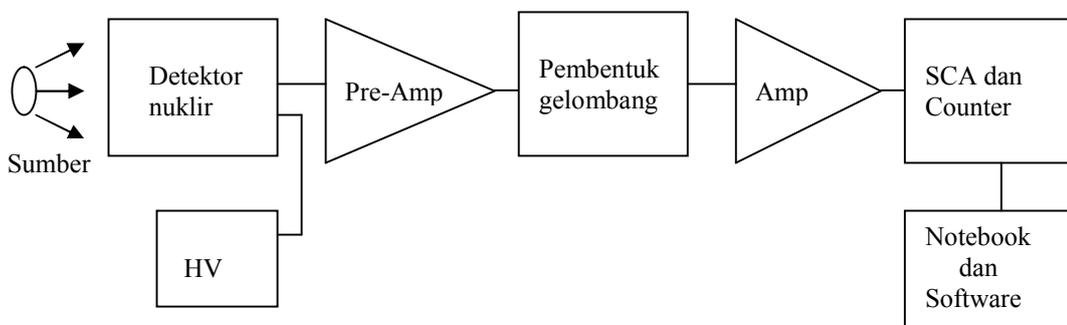
dengan  $\mu_F$  adalah koefisien serapan efek fotolistrik,  $\mu_C$  adalah koefisien serapan hamburan Compton dan  $\mu_P$  adalah koefisien serapan *pair production*.

## 3.2. Sistem Spektroskopi nuklir

Proses interaksi radiasi dengan materi dapat diamati melalui proses deteksi spektroskopi. Sistem pektroskopi radiasi nuklir terdiri dari detektor nuklir, unit pemasok tegangan tinggi (HV), rangkaian pre-amplifier (Pre-Amp), rangkaian

pembentuk gelombang, rangkaian amplifier (Amp), rangkaian *Single Channel Analyzer* (SCA), rangkaian pencacah (*counter*) dan komputer (notebook) yang dilengkapi dengan *software* untuk spektroskopi. Diagram blok sistem spektroskopi radiasi nuklir diperlihatkan pada Gambar 3.4.

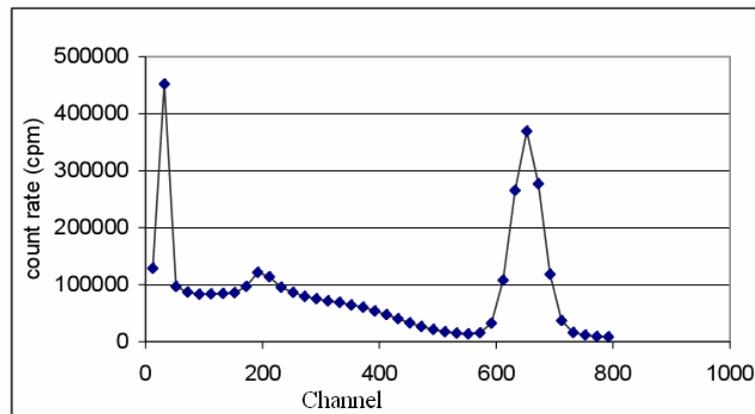
Sistem spektroskopi nuklir dapat dijelaskan sebagai berikut. Detektor nuklir menangkap radiasi gamma yang berasal dari suatu sumber radiasi nuklir (gamma). Oleh detektor radiasi gamma dikonversi menjadi sinyal listrik. Karena sinyal listrik hasil konversi detektor masih sangat lemah maka rangkaian penguat awal (pre-Amp) diperlukan. Pada umumnya detektor dan pre-Amp menjadi satu kesatuan (satu modul) dengan harapan derau lemah dan sinyalnya lebih kuat (*noise to signal ratio* rendah). Selanjutnya sinyal luaran pre-Amp dijadikan sebagai masukan bagi rangkaian pembentuk gelombang. Dalam rangkaian pembentuk gelombang ini telah terjadi proses *charge* dan *discharge* dengan waktu *charging* yang ditentukan oleh komponen RC. Selanjutnya waktu *charging* ini adalah menyatakan waktu *rising and falling* yang kemudian digunakan sebagai dasar menentukan lebar pulsa. Sinyal-sinyal masukan belum dapat dibaca oleh SCA maupun pencacah. Sinyal-sinyal keluaran dari rangkain pembentuk gelombang dapat menjadi masukan untuk rangkaian pengkondisi sinyal sehingga akhirnya sinyal luaran dari rangkaian pengkondisi sinyal dapat dibaca oleh SCA dan pencacah. Hasil cacahan disimpan pada memori notebook dan selanjutnya spektrum radiasi nuklir ditampilkan pada layar monitor notebook.



**Gambar 3.4.** Diagram blok sistem spektroskopi nuklir.

Contoh spektrum hasil spektroskopi gamma diperlihatkan pada Gambar

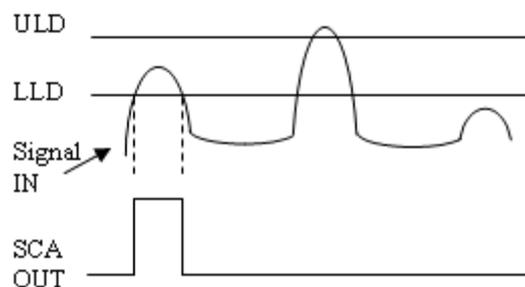
4.5. Sumbu mendatar menyatakan nomor kanal (*window*) yang bersesuaian dengan tingkat energi gamma yang dideteksi. Sumbu tegak menyatakan laju cacah dalam satuan *counts per minute* (cpm).



**Gambar 3.5.** Contoh spektrum hasil spektroskopi gamma.

### 3.3. Penganalisa saluran tunggal (*Single Channel Analyzer, SCA*)

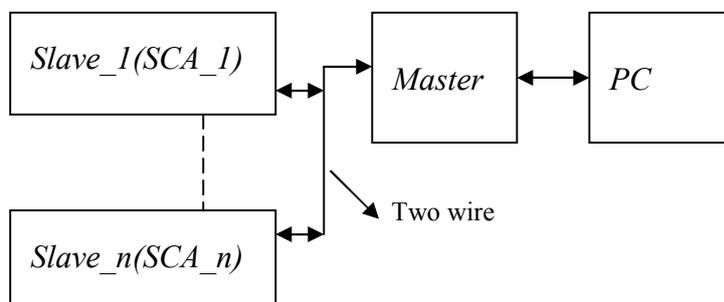
*Single Channel Analyzer* (SCA) adalah suatu piranti elektronik yang berfungsi menganalisis tinggi pulsa intensitas radiasi pada setiap kanal energi yang digunakan. SCA terdiri dari diskriminator atas (*upper level discriminator, ULD*) dan diskriminator bawah (*lower level discriminator, LLD*). SCA akan membangkitkan sebuah pulsa keluaran jika pulsa masukan berada diantara LLD dan ULD. Selanjutnya pulsa keluaran dari SCA akan diteruskan ke pencacah (*counter*) untuk dihitung jumlah cacahnya. Bentuk sinyal masukan dan pulsa luaran SCA diperlihatkan pada Gambar 3.6.



**Gambar 3.6.** Bentuk sinyal masukan dan luaran *Single Channel Analyzer*.

### 3.4. Sistem komunikasi I2C Bus

Sistem komunikasi *Inter Integrated Circuit (I2C) Bus* adalah sistem komunikasi data serial yang diciptakan oleh perusahaan *Philips*. Selain perusahaan *Philips*, perusahaan *ATMEL Corporation* yang memproduksi *chip Integrated Circuit (IC) AVR Microcontroller* juga mengembangkan komunikasi *I2C Bus* yang diberi nama *TWI Bus (Two-wire synchronous serial interface Bus)*. Kedua sistem komunikasi *I2C Bus* dari *Philips* dan *TWI Bus* dari *ATMEL Corporation* pada prinsipnya sama yaitu mengembangkan sistem komunikasi data serial menggunakan dua kabel. Sistem ini dalam berkomunikasi menggunakan dua jalur kabel yaitu jalur kabel pertama disebut *SDA (serial data)* sedangkan jalur kabel kedua adalah *SCL (serial clock)*. Sistem komunikasi *I2C Bus* dipakai untuk komunikasi antar *chip IC* ke *chip IC (master dan slave)*. *Chip IC* pertama terdiri dari rangkaian elektronik yang komponen utamanya berupa *Chip IC* mikrokontroler yang kemudian disebut *Master* sedangkan *chip IC* yang lainnya juga terdiri dari rangkaian elektronik dan mikrokontroler yang selanjutnya disebut *Slave*. Dalam implementasinya satu *master* dapat melayani lebih dari satu *slave*. Karena daya tampung memori mikrokontroler pada *Master* sangat terbatas, maka diperlukan perangkat lain yang dapat menampung data lebih besar yaitu *Personal Computer (Notebook)*. Ketiga perangkat ini dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 3.7.



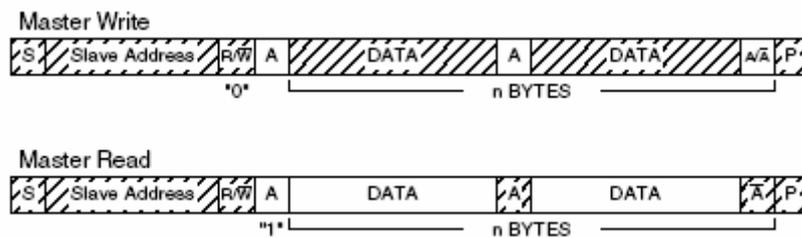
**Gambar 3.7.** Diagram blok sistem komunikasi *I2C Bus* antar *Slave*, *Master* dan *PC*

Apabila sistem *I2C Bus* terdiri dari banyak *Slave*, maka tiap-tiap *slave* diberi identitas yaitu alamat (*address*). Alamat *slave* sifatnya tidak ada yang sama (*unique*). *Master* dapat mengidentifikasi alamat *slave* sampai 7 bit, artinya *Master*

dapat mengidentifikasi 128 *slave* mulai dari alamat 0 sampai dengan alamat 127 (ATMEL Corporation, 1998). Dalam penelitian ini *Slave* terdiri dari *Single Channel Analyzer* (SCA) dan pencacah (*counter*).

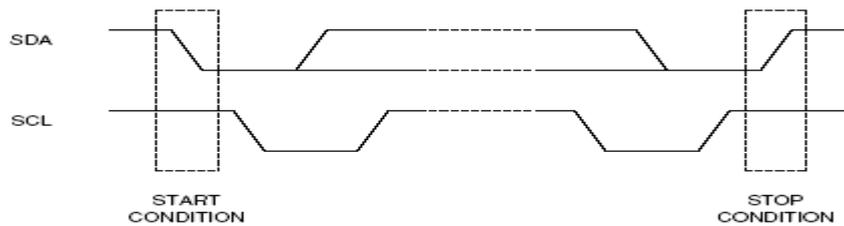
### 3.5. Master kontrol (*Master*)

Master kontrol berfungsi untuk mengendalikan semua *slave* (SCA) yaitu: membaca data secara bergantian dari tiap-tiap *slave*. Data yang telah dibaca kemudian diteruskan ke PC lewat saluran komunikasi serial (port com). Master kontrol dapat juga dikatakan identik dengan *multi-plexer*. Seperti halnya *multi-plexer* yang memiliki banyak input dan keluarannya tunggal. Dalam hal ini masukan dari master kontrol adalah *slave* sedangkan keluarannya adalah tranfer data ke PC. Transfer data antara master kontrol dan *slave* dapat dijelaskan seperti Gambar 3.8.



**Gambar 3.8.** Transfer data baca dan tulis antara *Master* dan *slave* (ATMEL Corporation, 1998)

Dari Gambar 3.8. dapat dijelaskan sebagai berikut. Dimulai dari S (*start*) lalu diikuti data alamat *slave* terdiri dari 7 bit selanjutnya data baca/tulis satu bit (R/W, tulis '0' baca '1') selanjutnya diikuti dengan *acknowledge* (A) berikutnya data terdiri dari 8 bit selanjutnya *acknowledge* lagi (A) baru data lagi terdiri dari 8 bit selanjutnya *acknowledge* lagi sampai data terakhir diikuti dengan *not acknowledge* ( $\bar{A}$ ) dan terakhir stop. Kondisi sinyal start dan stop dapat dijelaskan seperti Gambar 3.9.

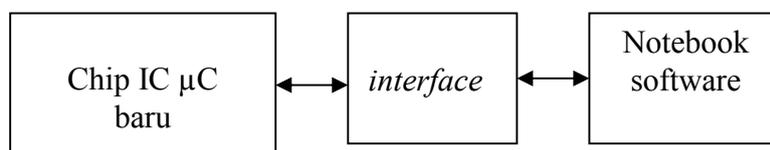


**Gambar 3.9.** Kondisi sinyal *start* dan *stop* pada komunikasi *I2C Bus* (ATMEL Corporation, 1998)

### 3.6. Mikrokontroler ( $\mu\text{C}$ )

Mikrokontroler ( $\mu\text{C}$ ) diproses menggunakan teknologi *high-density complementary metal-oxide semiconductor* (HCMOS). Mikrokontroler ( $\mu\text{C}$ ) dikemas dalam satu *chip peripherals* yang terdiri dari beberapa piranti seperti: *Central Processing Unit* (CPU) 8-bit, *4K Byte reprogrammable flash memory*, *128 x 8-bit internal RAM*, *32 programmable I/O lines*, *2 x 16-bit timer/counters* (ATMEL Corporation, 1998)

Dalam aplikasinya mikrokontroler ( $\mu\text{C}$ ) dibantu oleh program aplikasi (*program user*). Program aplikasi dibuat disesuaikan dengan tujuan dari aplikasi bersangkutan. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah bahasa *assembler* mikrokontroler. Program aplikasi dapat ditulis ke *flash memory* dengan menggunakan suatu perangkat yang disebut *EPROM Programmer (downloader)* khusus untuk mikrokontroler ( $\mu\text{C}$ ). Pengisian program ke chip IC  $\mu\text{C}$  dapat dijelaskan pada Gambar 3.10.



**Gambar 3.10.** Diagram blok *downloader* atau pengisian program ke dalam chip IC  $\mu\text{C}$ .

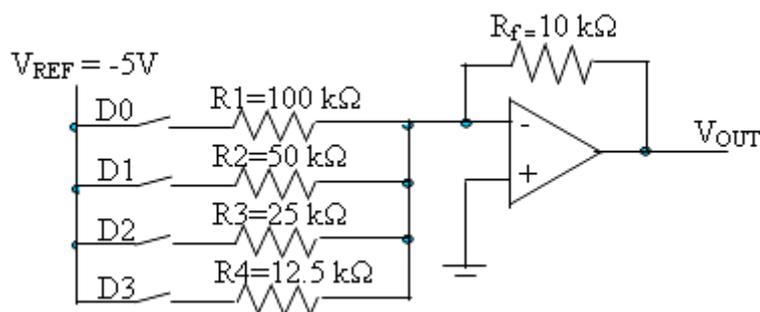
Dimulai dari pembuatan program aplikasi assembler sesuai dengan aplikasi yang diinginkan, dalam penelitian dibuat program aplikasi *Single Channel Analyzer* (SCA) dan pencacah (*counter*). Setelah program aplikasi selesai dibuat dan sudah siap di masukkan ke dalam Chip IC  $\mu\text{C}$ . Langkah selanjutnya disiapkan peralatan

untuk keperluan tersebut yaitu: sebuah PC, *interface*, *software* (perangkat lunak) untuk *downloader* yang sudah ter-intal pada PC dan chip IC  $\mu\text{C}$  yang baru (masih kosong). Langkah berikutnya adalah mengikuti petunjuk langkah-langkah *software downloader* yang digunakan.

### 3.7. Digital to Analog Converter (DAC)

Fungsi dari DAC adalah mengkonversi (mengubah) suatu bilangan biner (*binary word*) ke suatu arus atau tegangan listrik secara proporsional. Untuk mengetahui cara kerja dari DAC dapat dilihat pada rangkaian sederhana dari penjumlahan 4- masukan (*input*) seperti pada Gambar 3.11. dimana masukan *non-inverting* dari op-Amp disambung ke ground (tanda +). Dengan meng-ground-kan masukan *non-inverting* akan menahan masukan *inverting* pada level 0 volt.

Masukan *inverting* (tanda - ) pada rangkaian tersebut merupakan titik penjumlahan. Bilamana salah satu saklar (*switch*) ditutup, suatu arus akan mengalir dari  $-5\text{V}$  ( $V_{\text{ref}}$ ) melewati resistor ke titik penjumlahan. Op-Amp akan menarik (*pull*) arus melalui resistor umpan balik (*feedback*) untuk mengurangi suatu tegangan keluaran yang proporsional. Apabila *switch* D0 ditutup, suatu arus dari  $0,05\text{ mA}$  akan mengalir ke dalam titik penjumlahan. Supaya arus bisa melewati resistor *feedback*, op-Amp harus mengambil tegangan dari  $0,05 \times 10\text{ k}\Omega$  atau  $0,5\text{ V}$  ke keluaran (*output*). Apabila *switch* D1 juga ditutup itu akan mengirim arus lain  $0,1\text{ mA}$  ke titik penjumlahan. Supaya titik penjumlahan menarik arus melalui resistor *feedback*, op-Amp memiliki keluaran tegangan  $0,15\text{ mA} \times 10\text{ k}\Omega$  atau  $1,5\text{ V}$ .



**Gambar 3.11.** Skematik Rangkaian dasar DAC (Boylestad and Nashelsky , 1982)

Titik penjumlahan ini adalah merupakan resistor bobot binari yang menghasilkan arus bobot binari yang akan dijumlahkan oleh op-Amp untuk menghasilkan keluaran tegangan yang proporsional. Tegangan keluaran ( $V_{out}$ ) adalah suatu sinyal analog. *Switch* D3 merupakan MSB (*Most significant bit*) sebab penutupan *switch* D3 ini menghasilkan arus yang lebih besar.

### 3.8. Pengkondisi sinyal

Sinyal keluaran dari detektor *NaI(Tl)* masih sangat lemah. Karena masih lemah, maka rangkaian SCA belum bisa memproses sinyal tersebut. Supaya sinyal keluaran dari detektor *NaI(Tl)* dapat diproses oleh rangkaian SCA, maka perlu diperkuat lagi. Pengkondisi sinyal berfungsi sebagai penguat sinyal dari detektor *NaI(Tl)*, filter dan pembentuk gelombang. Keluaran dari pengkondisi sinyal ini sudah cukup kuat untuk diproses oleh rangkaian SCA. Bahan utama dari rangkaian pengkondisi sinyal adalah IC Op-Amp (*Operational Amplifier*) sebagai komponen penguatan sinyal, kapasitor, resistor dan potensio sebagai *filter* (tapis) dan pembentuk gelombang. Dimana rumus penguatan ( $A_v$ ) adalah perbandingan tegangan luaran ( $V_{out}$ ) dengan tegangan masukan ( $V_{in}$ ).

$$A_v = \frac{V_{Out}}{V_{In}} \quad (3.10)$$

### 3.9. Uji korelasi T berpasangan

Uji korelasi T (uji T) berpasangan digunakan untuk membandingkan dua buah data diperoleh dari hasil pengujian dari masing-masing alat. Dalam penelitian ini uji T berpasangan dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian alat yang telah dirancang bangun dengan alat pembanding buatan pabrikan. Sebagai contoh hasil percobaan dari alat yang dirancang bangun diperoleh dalam bentuk sebuah Tabel X dan hasil percobaan dari alat pembanding diperoleh Tabel Y. Tabel D adalah nilai rata-rata data X dikurangi nilai rata-rata data Y dari masing-masing pengamatan.

Hipotesis Statistiknya sebagai berikut:

$$H_a : \mu_0 \geq \mu_1 \quad (3.11)$$

$$H_o : \mu_0 \leq \mu_1 \quad (3.12)$$

Kriteria uji

$$\text{Jika } t_{\text{hitung}} \leq + t_{\text{tabel}} \quad (3.13)$$

Maka :  $H_o$  diterima

$$t_{\text{hitung}} = \frac{\bar{x} - \mu_0}{SD / \sqrt{N}} \quad (3.14)$$

Untuk melihat nilai uji T pada tabel D memakai nilai *df* (*degrees of freedom*) atau derajat kebebasan yaitu banyaknya sampel dikurangi satu. Nilai *df* ini untuk menentukan posisi baris pada tabel. Untuk menentukan kolom data pada tabel menggunakan nilai  $\alpha$  (tingkat kebenaran data yang diasumsikan). Tabel D akan diuji berdasarkan uji T menggunakan program *SPSS* versi *Windows XP*.

## **BAB IV**

### **CARA PENELITIAN DAN RANCANG BANGUN**

Pada bab ini dijelaskan cara penelitian yang dilakukan dan rancang-bangun sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor. Pada bagian cara penelitian dijelaskan tempat dan waktu penelitian, bahan penelitian, alat penelitian, cara kerja dan cara analisis. Pada bagian rancang bangun dijelaskan proses rancang-bangun pengkondisi sinyal, SCA, master kontrol dan sistem komunikasi data, serta pengembangan perangkat lunak yang diperlukan.

#### **4.1. Cara Penelitian**

##### **4.1.1. Tempat dan waktu Penelitian**

Sebagian besar penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fisika Citra, Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Gadjah Mada Yogyakarta. Penelitian berlangsung dari bulan Februari 2004 sampai dengan bulan Desember 2008. Namun untuk pengujian terhadap pengkondisi sinyal dan counter dilakukan di PTAPB BATAN Babarsari Yogyakarta yang dilakukan antara bulan Januari sampai bulan Juli 2008.

##### **4.1.2. Bahan Penelitian**

Bahan penelitian terdiri atas:

- a). Sumber radiasi gamma Cs-137 dengan aktivitas mula-mula ( $A_0$ ) sebesar 3  $\mu\text{Ci}$ , energi 662 keV, dan waktu paruh ( $T_{1/2}$ ) 30,2 tahun.
- b). IC mikrokontroler ATtiny 2313, IC DAC 7611P, IC Op-Amp OPA227, IC LM139 dan komponen elektronika pasif lainnya.

##### **4.1.3. Alat Penelitian**

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- a) Detektor gamma NaI(Tl) BICRON model 212/2P.
- b) Kolimator berbahan timbal (Pb) tebal 10 mm dan lubang kolimator 2 mm.
- c) Catu daya detektor (buatan sendiri) dengan tegangan operasi 900 Vdc.

- d) Oscilloscope KENWOOD model CS-4125 20 MHz.
- e) Tameng timbal setebal 4 cm mengelilingi sumber radiasi Cs-137.
- f) EPROM Programmer sebagai *downloader* alat bantu untuk pemrograman ke dalam mikrokontroler.
- g) Notebook Pentium 4 1,6 GHz. RAM 1GB, HD 80 GB, monitor LCD 14” dengan sistem operasi MS Windows XP.
- h) Bahasa pemrograman Borland Delphi 6.0 dan Turbo Assembler.

#### **4.1.4. Proses Penelitian**

- a) Pada awal penelitian dilakukan proses persiapan alat dan bahan penelitian seperti tersebut pada bagian 4.1.2. dan bagian 4.1.3.
- b) Selanjutnya dilakukan proses rancang-bangun sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor, yang terdiri atas modul sistem: pengkondisi sinyal, SCA dengan counter, master kontrol, perangkat lunak untuk kendali mikrokontroler dan perangkat lunak akusisi dan pengolahan data.
- c) Setelah proses rancang-bangun selesai dilakukan proses uji permodul untuk meyakinkan kinerja modul sistem yang telah dirancang-bangun.
- d) Kemudian modul-modul diintegrasikan menjadi suatu sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor. Secara khusus dibuat empat SCA sebagai model sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor.
- e) Uji kinerja sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor dilakukan dengan cara mengamati spektrum radiasi nuklir Cs-137.
- f) Untuk uji itu, bagian masukan dihubungkan dengan detektor gamma NaI(Tl) BICRON model 212/2P. Namun untuk menguji kesamaan kinerja terhadap semua SCA yang dibuat, keluaran dari detektor ditandem secara paralel sebanyak empat kali sehingga diperoleh empat keluaran yang memiliki kualitas sama.
- g) Kemudian keempat keluaran tersebut masing-masing dimasukkan ke masing-masing bagian masukan SCA.
- h) Lalu keluaran dari masing-masing SCA diamati menggunakan perangkat lunak akusisi dan pengolah data yang telah diinstalasikan pada Notebook.

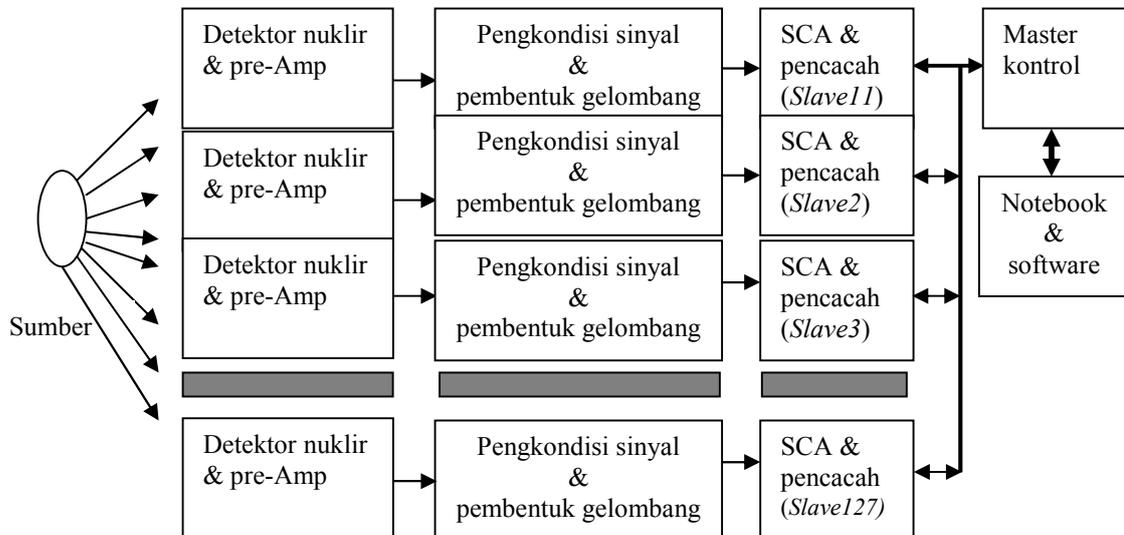
- i) Dari proses akuisisi data diperoleh spektrum Cs-137 untuk setiap SCA yang dibuat. Secara prinsip seharusnya spektrum dari keempat SCA sama.
- j) Apabila spektrum yang dihasilkan belum sama, maka dilakukan pengaturan (*setting*) pada bagian pengkondisi sinyal.
- k) Analisis kesamaan spektrum dilakukan dengan membandingkan pola spektrum yang diperoleh dengan pola spektrum hasil dari alat spektroskopi standard buatan ORTEC.
- l) Analisis kesamaan spektrum juga dilakukan dengan uji korelasi antar spektrum dimana salah satu spektrum dianggap sebagai standard.

## **4.2. Proses Rancang-bangun**

### **4.2.1. Sistem Perangkat Keras**

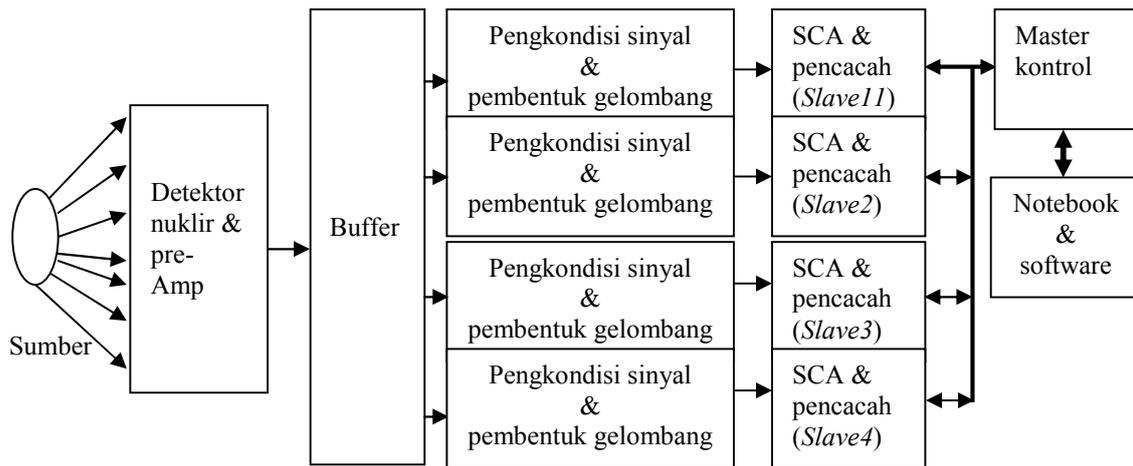
Sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor dapat disusun untuk 127 buah sistem spektroskopi radiasi nuklir satu detektor yang saling independen seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1. Sistem spektroskopi radiasi nuklir satu detektor terdiri dari sumber radiasi nuklir, detektor nuklir, pre-Amplifier (pre-Amp), pengkondisi sinyal, pembentuk gelombang, SCA, pencacah dan notebook (komputer) sebagaimana telah disebut di bagian 3.2. Untuk menggabungkan atau mengintergrasikan ke 127 sistem spektroskopi radiasi nuklir satu detektor diperlukan sebuah master kontrol dan sistem komunikasi data I2C bus. Hasil integrasi itu berefek pada sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor bekerja secara simultan. Bekerja secara simultan maksudnya adalah bahwa masing-masing sistem spektroskopi radiasi nuklir satu detektor dapat mengerjakan tugasnya sendiri-sendiri tidak tergantung dengan yang lainnya, namun keseluruhannya dikendalikan oleh master kontrol melalui sistem komunikasi data I2C bus. Sebagaimana telah disebut di bagian 3.4, sistem komunikasi data I2C bus adalah sistem komunikasi data antar *master* dan *slave*. Sistem spektroskopi radiasi nuklir satu detektor oleh master kontrol dianggap sebagai suatu *slave* yang masing-masing *slave* diberi identitas berupa alamat (*address*). Sistem spektroskopi radiasi nuklir satu detektor pertama dalam hal ini disebut *slave1* diberi identitas alamat 001,

sistem spektroskopi radiasi nuklir satu detektor kedua disebut *slave2* diberi identitas alamat 002 dan sampai ke *slave127* yang diberi identitas alamat 127.



**Gambar 4.1.** Diagram blok sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor

Namun dalam penelitian ini hanya dapat direalisasi sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor untuk empat buah sistem spektroskopi radiasi nuklir satu detektor. Hal ini disebabkan faktor biaya untuk membuat sebuah sistem spektroskopi radiasi nuklir satu detektor yang relatif mahal. Juga karena keterbatasan peralatan terutama ketersediaan sebuah detektor nuklir yang hanya ada satu buah. Untuk itu realisasi rancang-bangun yang sesuai dengan tujuan penelitian ini dilakukan dengan mengikuti diagram blok sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2. Agar satu detektor dapat dimanfaatkan, dibuat suatu sistem buffer yang dapat menguatkan sinyal keluaran detektor kemudian membaginya menjadi empat keluaran yang memiliki karakteristik sama.



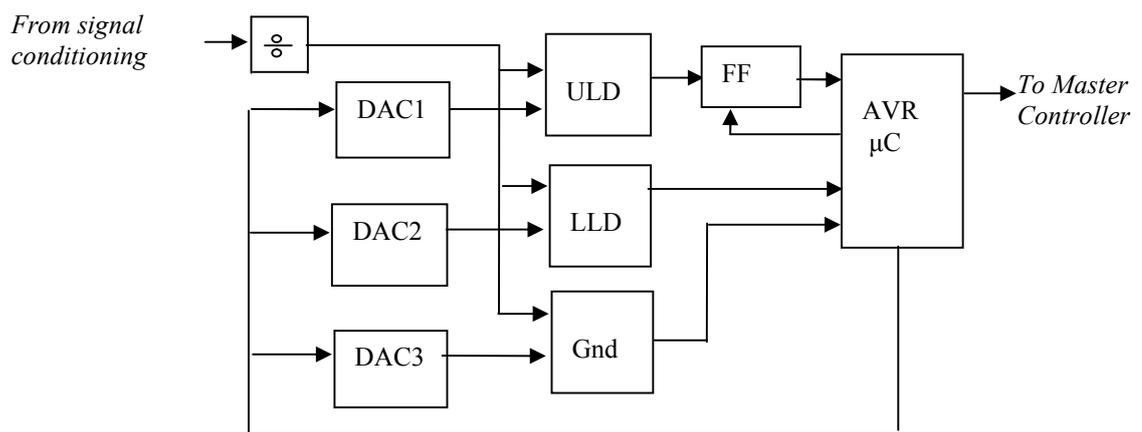
**Gambar 4.2.** Diagram blok sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor yang direalisasikan

#### 4.2.2. Rangkaian SCA dan Pencacah

Penganalisis kanal tunggal (*Single channel Analyzer, SCA*) merupakan bagian utama pada sistem spektroskopi nuklir. Pada penelitian ini rangkaian SCA dan pencacah (*counter*) terbuat dalam satu chip IC mikrokontroler ( $\mu\text{C AVR}$ ) tipe ATtiny 2313, data *sheets* disajikan pada Lampiran H.1. Fungsi  $\mu\text{C AVR}$  adalah untuk pengendali komponen *Digital to Analog Converter* (DAC1, DAC2, DAC3) sebagai selektor kanal, komponen *Flip-flop* (FF) dan penghitung banyaknya cacah radiasi (*counter*). Diagram blok SCA ditunjukkan pada Gambar 4.3. Rangkaian skematik SCA ditunjukkan pada bagian Lampiran A. Pada SCA terdapat dua diskriminator, yaitu diskriminator level atas (ULD) dan diskriminator level bawah (LLD). Tiap diskriminator berfungsi untuk membatasi dan mengidentifikasi sinyal masukan. Bila sinyal masukan berada di bawah LLD maka mikrokontroler AVR ( $\mu\text{C AVR}$ ) tidak menghasilkan keluaran pulsa kotak. Artinya tidak ada cacah radiasi yang terdeteksi. Demikian juga bila sinyal masukan berada di atas ULD maka juga dianggap tidak ada cacah radiasi yang terdeteksi. Pulsa yang menyatakan adanya cacah radiasi baru dapat dibangkitkan bila sinyal masukan berada diantara LLD diskriminator bawah dan ULD diskriminator atas. Untuk selanjutnya lebar antara LLD dan ULD dapat dinyatakan dengan lebar *window*. Untuk melakukan

pencacahan yang berkaitan dengan sinyal radiasi dengan energi tertentu maka lebar window ditentukan dan *level* sinyal rata-rata ditentukan.

Rangkaian diskriminator level atas ULD (DAC1) dan diskriminator level bawah LLD (DAC2) terbuat dari chip IC Op-Amp tipe LM139 buatan *Texas Instruments Incorporated* (1979), data *sheets* IC Op-Amp tipe LM139 terlampir pada Lampiran H.3. Penyeleksi kanal (*channel selector*) terbuat dari chip IC *Digital to Analog Converter* tipe 7611 buatan *Burr-Brown Corporation* (1997) yang memiliki resolusi 12 bit, data *sheets* disajikan pada Lampiran H.2. Dengan IC DAC ini suatu diskriminator dapat melakukan pengelompokan terhadap tinggi sinyal yang masuk ke dalam 4096 kanal (*channel*). Tinggi sinyal keluaran dari detektor yang telah diperkuat oleh pengkondisi sinyal bervariasi antara 0 V DC sampai 10 V DC. Karena komponen DAC adalah komponen Transistor Transistor Logic (TTL) yang hanya dapat menerima masukan sinyal 0 V DC sampai 5 V DC, maka sinyal dari detektor perlu dibagi 2,5 kali. Dengan demikian, sinyal masukan ke SCA menjadi maksimum 4 V sehingga setiap kanal pada SCA mewakili 1 mV.



**Gambar 4.3.** Diagram blok SCA.

Untuk mereduksi pengaruh *dead time* yaitu: banyaknya sinyal yang hilang (*loose*) maka digunakan DAC7611 tambahan (DAC3). DAC3 pada dasarnya adalah diskriminator yang dibuat untuk meloloskan semua sinyal yang masuk di atas Gnd. Kemudian dengan membandingkan pulsa yang tercacah oleh SCA dengan pulsa

yang masuk sesungguhnya dapat dihitung *dead time*-nya. Rangkaian *Flip-flop* (FF) berfungsi sebagai penyangga (*buffer*) yang dapat dibuat dari chip IC TTL 74LS00. Selanjutnya cacah yang terdeteksi dapat dikirim ke *master controller*.

#### **4.2.3. Rangkaian Pengkondisi Sinyal**

Rangkaian pengkondisi sinyal adalah rangkaian penguat tegangan keluaran dari detektor (*amplifier*) dan penyaring sinyal (*filter*). Rangkaian pengkondisi sinyal dirancang bertingkat (*cascade*) untuk menghindari terjadinya gangguan (*noise*). Rangkaian pengkondisi sinyal dirancang memiliki 4 (empat) tingkat penguatan. Tingkat pertama adalah penguatan satu kali sekaligus berperan sebagai *buffer*. Tingkat kedua penguatannya adalah 2 (dua) kali. Tingkat ketiga penguatannya adalah 15 (lima belas) kali dan tingkat keempat penguatannya adalah 3,3 kali. Dengan demikian rancangan akhir pengkondisi sinyal ini akan menghasilkan penguatan 100 kali.

Rangkaian pengkondisi sinyal menggunakan komponen utama berupa IC (IC1, IC2, IC3 dan IC4) yaitu Op-amp tipe OPA227 buatan *Burr-Brown Corporation* (1998), data *sheets* disajikan pada Lampiran H.4. Sedangkan kapasitor, resistor dan potensiometer disusun sedemikian rupa sehingga membentuk suatu rangkaian pengkondisi sinyal yang mampu menguatkan sinyal masukan sampai 100 (seratus) kali. Rangkaian skematik dari pengkondisi sinyal dapat dilihat pada Lampiran B.

#### **4.2.4. Rangkaian Master Kontrol**

Rangkaian master kontrol adalah rangkaian untuk mengendalikan semua SCA. Cara kerjanya adalah dengan mengirim instruksi *start* ke semua SCA sehingga semua SCA melakukan pencacahan secara independen satu sama lain dalam periode waktu pencacahan yang telah ditentukan oleh perangkat lunak di dalam mikrokontroler AVR ( $\mu\text{C}$  AVR) pada masing-masing SCA. Setelah waktu pencacahan selesai, master kontrol membaca data hasil cacahan dari masing-masing SCA dan selanjutnya mengirimkan hasil cacahan ke *notebook*.

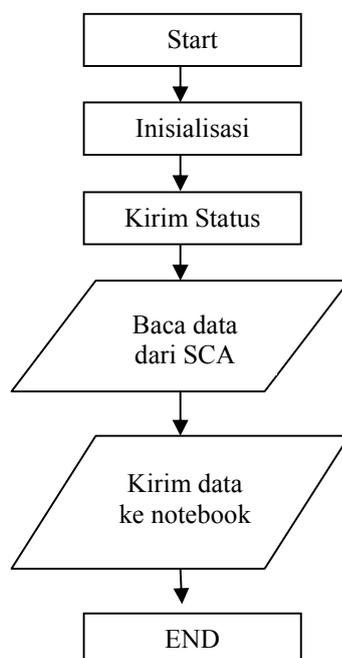
Secara lebih detail cara kerja master kontrol membaca data dari masing-masing SCA (*slave*) dapat dijelaskan sebagai berikut. Mula-mula master kontrol mengirim sinyal *start* (mulai) ke semua *slave* sebagai tanda perintah (instruksi) kepada semua *slave* untuk mulai bekerja, yaitu melakukan proses analisa sinyal dan mencacah pulsa (*counting*). Keempat *slave* ketika menerima instruksi *start* dapat bekerja secara serentak (simultan). Lamanya *slave* bekerja atau melakukan pencacahan ditentukan melalui perangkat lunak yang diinstalasi ke dalam mikrokontroler AVR ( $\mu$ C AVR). Waktu pencacahan dapat bervariasi untuk setiap *slave*, namun untuk tujuan praktis waktu pencacahan setiap *slave* dibuat sama yaitu satu detik. Dengan demikian bila diperlukan pencacahan lebih besar dari satu detik maka dilakukan proses pengulangan instruksi. Karena lama waktu kerja sama, maka saat berhenti bekerja juga sama sehingga tidak perlu menunggu instruksi *stop* (berhenti) dari master kontrol. Ketika master kontrol membaca hasil *counting* (cacah) dari semua *slave*, master kontrol mengirim instruksi berupa alamat *slave* ke semua *slave* (dari 000 sampai 127). Selanjutnya semua *slave* akan mencocokkan alamat yang dikirim oleh master kontrol dengan alamat dirinya sendiri. *Slave* yang alamatnya sama (misalnya *slave* yang alamatnya 001) akan merespon instruksi dari master kontrol untuk melayani instruksi selanjutnya yang diinginkan oleh master kontrol. Bila sebaliknya maka *slave* tidak merespon. *Slave* yang alamatnya sama akan mengirimkan data hasil cacah ke master kontrol. Master kontrol selanjutnya mengirim cacahan ke komputer untuk dikumpulkan (dikoleksi) dan disimpan dalam bentuk *File*. Begitu seterusnya master kontrol membaca *slave* yang lainnya sampai *slave* yang terakhir. Dalam hal ini *slave* yang dibuat beralamat 001, 002, 003 dan 004. Selama master kontrol membaca hasil cacahan dari *slave*, proses *counting* ditahan (*hold*). Setelah selesai membaca semua cacah dari *slave*, master kontrol mengirim instruksi *start* lagi untuk mengawali proses analisa sinyal dan pencacahan pulsa yang berikutnya. Proses pencacahan ini dilakukan menggunakan perangkat lunak pencacah yang disusun menggunakan Turbo Assembler.

#### 4.2.5. Sistem Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang disusun terdiri dari dua jenis yaitu: perangkat lunak untuk mikrokontroler dan perangkat lunak untuk akuisisi data dan penampil spektrum radiasi. Perangkat lunak untuk mikrokontroler dibangun dengan bahasa pemrograman tingkat rendah Turbo Assembler dan perangkat lunak untuk akuisisi data dan penampil spektrum radiasi dibangun dengan bahasa pemrograman tingkat tinggi yaitu Borland Delphi 6.0. Untuk menjalankan perangkat lunak tersebut menggunakan sistem operasi Microsoft Windows XP.

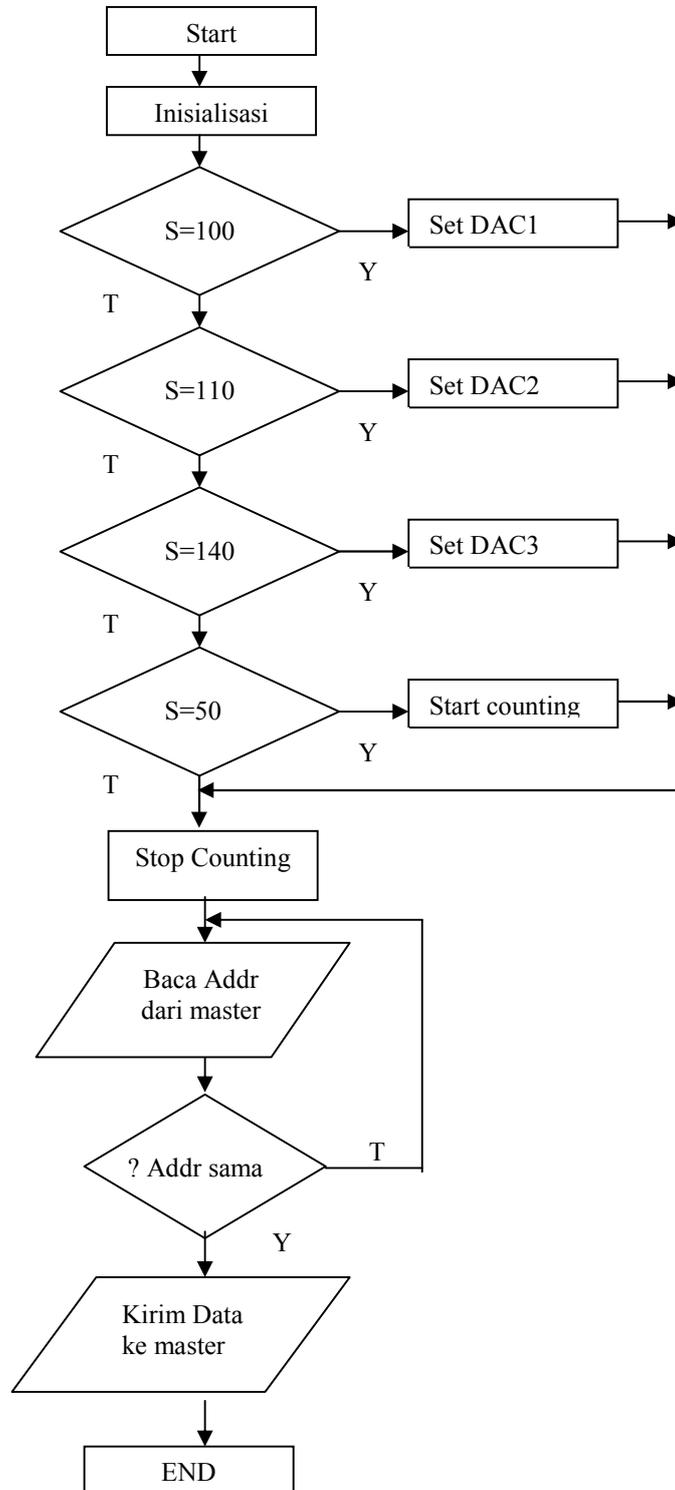
##### 4.2.5.a. Sistem Perangkat Lunak untuk Mikrokontroler

Sistem perangkat lunak untuk mikrokontroler adalah suatu perangkat lunak yang diinstalasikan pada mikrokontroler. Perangkat lunak mikrokontroler ada dua macam yaitu perangkat lunak mikrokontroler pada master kontrol dan pada SCA. Perangkat lunak pada master kontrol berfungsi untuk mengendalikan proses pengiriman sinyal status *start counting* ke SCA, membaca data hasil cacah dari semua SCA dan mengirim data cacah tadi ke notebook melalui sistem komunikasi data I2C bus. Diagram alir perangkat lunak pada master kontrol ditunjukkan pada Gambar 4.4.



**Gambar 4.4.** Diagram alir perangkat lunak pada master kontrol.

Perangkat lunak pada SCA berfungsi untuk melakukan setting DAC pada SCA dan mengendalikan proses *counting*.



Gambar 4.5. Diagram alir perangkat lunak pada SCA.

Mula-mula setelah SCA mendapat perintah status start counting dari master kontrol, setiap SCA melakukan proses inisialisasi untuk sinkronisasi port. Selanjutnya SCA menerima perintah status ULD (status S=100) sehingga SCA dapat melakukan proses *setting* DAC1. Kemudian SCA menerima perintah status LLD (status S=110) sehingga SCA dapat melakukan proses *setting* DAC2 dan menerima perintah status Gnd (status S=140) untuk data *setting* DAC3. Setelah itu SCA membaca status *start counting* (status S=50) sehingga terjadi proses pencacahan (*counting*) sinyal luaran dari detektor yang telah diperkuat oleh pengkondisi sinyal.

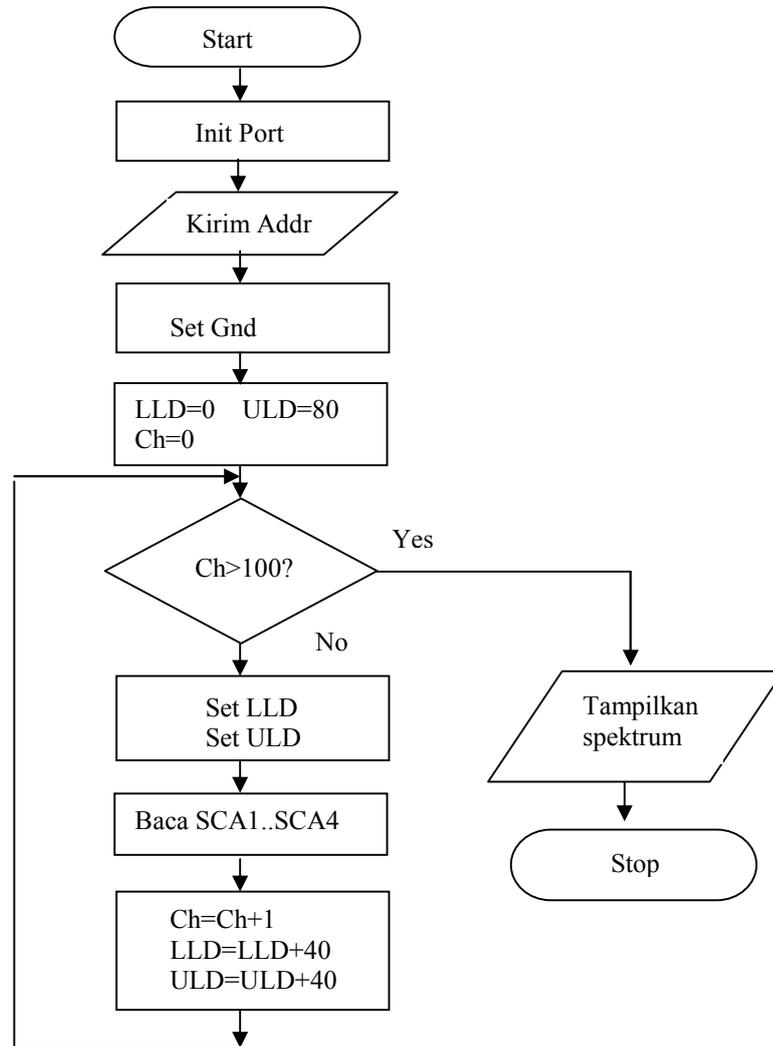
Durasi waktu pencacahan diatur selama satu detik sesuai dengan program *default* yang ada pada mikrokontroler. Untuk durasi waktu pencacahan lebih dari satu detik, maka perlu dilakukan proses pemrograman ulang terhadap mikrokontrolernya. Akhirnya SCA membaca status alamat (Addr) dari master kontrol dan apabila alamat tersebut sama dengan alamat SCA maka data hasil cacah dikirim ke master kontrol untuk diteruskan ke notebook. Diagram alir perangkat lunak pada SCA diperlihatkan pada Gambar 4.5.

#### **4.2.5.b. Sistem Perangkat Lunak untuk Akusisi data dan penampil spektrum radiasi.**

Perangkat lunak untuk akusisi data adalah suatu perangkat lunak aplikasi yang operasikan pada notebook. Perangkat lunak akusisi data ini berfungsi untuk mengendalikan proses inisialisasi port, mengirim alamat SCA, mengirim data *setting gound level*, mengirim data *setting lower level*, mengirim data *setting upper level*, mengirim data *start counting*, menunggu proses pencacahan (*counting*) selesai, membaca data hasil cacahan, mengirim data cacahan ke notebook dan menampilkan spektrum radiasi nuklir. Secara diagram alir perangkat lunak untuk akusisi data penampil spektrum radiasi dapat dilihat pada Gambar 4.6.

Ketika proses inisialisasi port seperti sinkronisasi sistem komunikasi data antara notebook dengan master kontrol. Setelah itu notebook mengirim data alamat SCA yang hendak dibaca ke master kontrol, lalu diikuti dengan pengiriman *setting* Gnd, ULD dan LLD sehingga SCA dapat menentukan batas bawah dan batas atas

dari window (jendela) energi radiasi nuklir yang hendak dicacah. Secara analog Gnd, ULD dan LLD dinyatakan dalam satuan mV. Bila setting tersebut telah selesai maka dilakukan proses *counting*.



**Gambar 4.6.** Diagram alir perangkat lunak akusisi data dan penampil spektrum radiasi nuklir.

Untuk itu notebook mengirim perintah ke master kontrol sehingga master kontrol dapat memerintahkan setiap SCA yang dipilih untuk melakukan proses counting radiasi nuklir. Setelah proses counting selesai sesuai dengan waktu default counting yang ada, master kontrol memindahkan data dari SCA ke notebook. Akhirnya data yang telah masuk ke notebook ditampilkan pada layar monitor dan puncak (peak) energi (dalam mV) ditentukan.

## **BAB V**

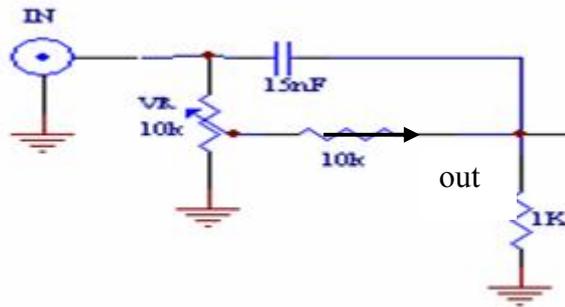
### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab sebelumnya telah dibahas perihal cara penelitian dan proses rancang bangun sistem instrumen yang dibuat pada penelitian ini. Pada bab ini diuraikan hasil pengujian rangkaian-rangkaian modul penyusun sistem dan hasil uji sistem instrumen secara keseluruhan. Uji rangkaian modul dilakukan agar dapat diketahui kehandalannya apakah sudah sesuai dengan tujuan perancangannya. Adapun pengujian yang dilakukan dibagi menjadi tiga katagori yaitu: pengujian perangkat keras, pengujian perangkat lunak dan pengujian sistem keseluruhan. Untuk pengujian perangkat keras dibagi dalam tiga tahapan yaitu pengujian pengkondisi sinyal, pengujian bentuk gelombang luaran dan pengujian prototype SCA. Pada pengujian perangkat lunak dibagi dua yaitu pengujian perangkat lunak untuk mikrokontroler yang dibangun dengan Turbo Assembler dan pengujian perangkat lunak untuk akusisi data yang dibangun dengan Borland Delphi 6.0. Dan yang terakhir pengujian sistem spektroskopi radiasi nuklir multi detektor secara keseluruhan.

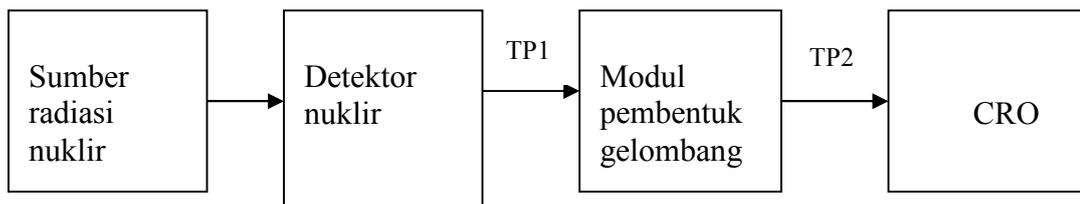
#### **5.1. Pengujian perangkat keras (*hardware*)**

##### **5.1.1. Pengujian pembentuk gelombang**

Pengujian rangkaian pembentuk gelombang yang skematiknya seperti pada Gambar 5.1. dilakukan di Laboratorium Fisika Citra FMIPA UGM Yogyakarta. Diagram blok pengujian bentuk gelombang terlihat pada Gambar 5.2. Pada pengujian rangkaian itu ada dua titik tes (*test point*, TP) yaitu TP1 dan TP2. TP1 untuk melihat bentuk gelombang luaran langsung dari detektor dan TP2 untuk melihat bentuk gelombang luaran dari pengkondisi sinyal.

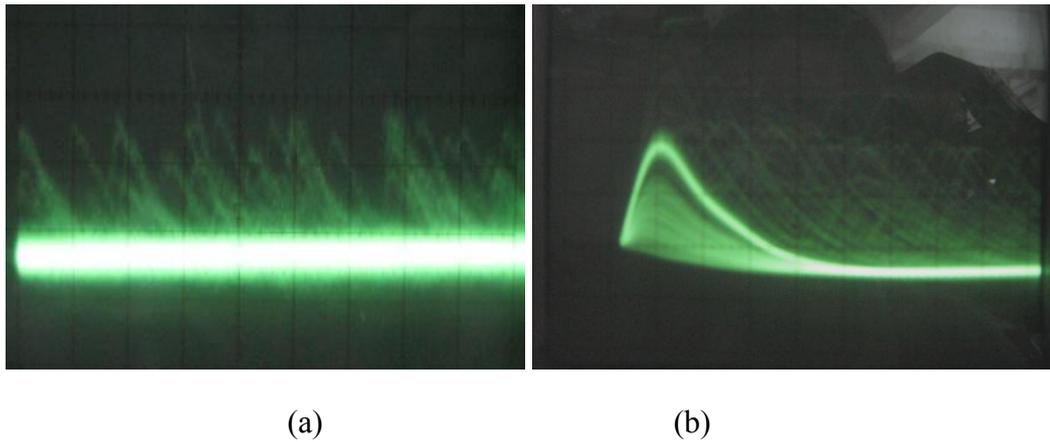


**Gambar 5.1.** Skematik rangkaian pembentuk gelombang.



**Gambar 5.2.** Diagram blok pengujian pembentuk gelombang

Hasil pengujian rangkaian pembentuk gelombang diperlihatkan pada Gambar 5.3. Pada Gambar 5.3.a. ditunjukkan bentuk sinyal masukan pada TP1 yang diperoleh langsung dari detektor. Pada Gambar 5.3.b. ditunjukkan bentuk sinyal luaran dari rangkaian pembentuk gelombang pada TP2. Pada kedua gambar tersebut sumbu tegak menyatakan tegangan, sedangkan sumbu mendatar menyatakan waktu. Pada kedua gambar tersebut tinggi sinyal tegangan adalah sama, yang berarti sinyal tersebut belum mengalami penguatan. Dalam rangkaian pembentuk gelombang ini telah terjadi proses *charge* dan *discharge* dengan waktu *charging* yang ditentukan oleh komponen RC. Selanjutnya waktu *charging* ini adalah menyatakan waktu *rising and falling* yang kemudian digunakan sebagai dasar menentukan lebar pulsa. Sinyal-sinyal masukan belum dapat dibaca oleh SCA maupun pencacah. Namun sinyal-sinyal keluaran dari rangkain pembentuk gelombang akan menjadi masukan untuk rangkaian pengkondisi sinyal sehingga akhirnya dapat dibaca oleh SCA dan pencacah.



**Gambar 5.3.** Hasil pengujian bentuk gelombang luaran (a) bentuk luaran langsung dari Detektor (b) bentuk luaran dari pengkondisi sinyal.

### 5.1.2. Pengujian Modul Pengkondisi Sinyal

Modul pengkondisi sinyal terdiri dari rangkaian penguat sinyal (*amplifier*) dan tapis (*filter*). Rangkaian penguat sinyal berfungsi untuk menguatkan sinyal luaran dari detektor yang ordenya masih dalam mV menjadi dalam orde Volt, sedangkan rangkaian tapis berfungsi untuk menghilangkan sinyal-sinyal pengganggu (*noise*). Jadi dalam pengujian ini diperoleh hasil berupa bentuk gelombang yang tidak mengalami distorsi (normal) dan besar penguatannya.

Dalam pengujian modul pengkondisi sinyal digunakan *Pulse Generator* Model GI-3 merk BNC sebagai pembangkit sinyal yang tersedia di Laboratorium Pengujian Elektronika PTAPB BATAN Yogyakarta. Selanjutnya pengujian dilakukan dalam dua tahapan. Pada tahap pertama sinyal tegangan sinusoidal yang divariasi dimasukan namun frekuensi sinyal tersebut diatur tetap 2500 Hz. Pada tahap kedua frekuensi sinyal tegangan sinusoidal divariasi dimasukan namun amplitudonya diatur tetap 30 mV. Hasil uji ditampilkan pada *Catode Ray Oscillator* (CRO) analog. Diagram blok pengujian modul pengkondisi sinyal diperlihatkan pada Gambar 5.4.



**Gambar 5.4.** Diagram blok pengujian modul pengkondisi sinyal.

Hasil uji untuk mengamati hubungan masukan sinyal tegangan sinusoidal yang bervariasi pada frekuensi tetap 2500 Hz dengan tegangan luaran (output) untuk empat kali pengujian ditampilkan pada Tabel 5.1. Sedangkan pada Tabel 5.2 ditunjukkan hasil uji pengamatan hubungan masukan frekuensi sinyal yang bervariasi pada tegangan tetap 30 mV dengan tegangan luaran (output) untuk empat kali pengujian.

Tabel 5.1. Hasil uji modul pengkondisi sinyal pada frekuensi tetap 2500 Hz.

No.	Masukan, $V_{in}$ (mV)	Luaran, $V_{out}$ (volt)				Bentuk gelombang
		1	2	3	4	
1	5	0,5	0,6	0,6	0,6	Normal
2	10	1	1,2	1,2	1,2	Normal
3	15	1,5	1,6	1,6	1,6	Normal
4	20	2	2,1	2,2	2,2	Normal
5	25	2,5	2,5	2,8	2,7	Normal
6	30	2,9	3,1	3,4	3,2	Normal
7	35	3,4	3,6	3,6	3,6	Distorsi
8	40	3,4	3,6	3,6	3,6	Distorsi
9	45	3,4	3,6	3,6	3,6	Distorsi

Pada Tabel 5.1. tampak mulai tegangan masukan 35 mV diperoleh  $V_{out}$  luaran 3,6 V dengan bentuk gelombangnya yang mengalami cacat (distorsi). Berdasarkan rumus (3.10) penguatannya dapat dihitung yaitu sekitar 100 kali, yang sudah sesuai dengan rencana rancangan.

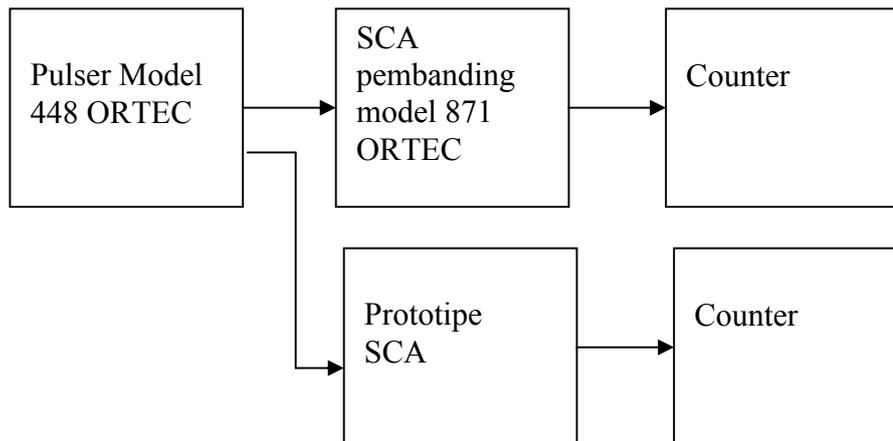
Tabel 5.2. Hasil uji tanggap frekuensi modul pengkondisi sinyal pada tegangan tetap 30 mV.

No.	Masukan (Hz.)	Luaran (volt)			
		1	2	3	4
1	50	3	3	3	3
2	100	3	3	3	3
3	500	3	3	3	3
4	1.000	3	3	3	3
5	5.000	3	3	3	3
6	10.000	3	3	3	3
7	15.000	3	3	3	3
8	20.000	3	3	3	3
9	25.000	3	3	3	3
10	30.000	3	3	3	3
11	35.000	2,9	2,9	2,9	2,9
12	40.000	2,8	2,8	2,8	2,8
13	45.000	2,7	2,7	2,7	2,7

Pada Tabel 5.2. saat frekuensi masukan antara 50 Hz. sampai dengan 30.000 Hz, tegangan luaran masih stabil yaitu 3 V. Untuk frekuensi di atas 30.000 Hz. tegangan keluaran mulai tidak stabil yaitu lebih kecil dari 3 V. Jadi dari Tabel 5.2. dapat disimpulkan bahwa frekuensi sinyal maksimum yang dapat dideteksi oleh modul pengkondisi sinyal adalah 30.000 Hz. atau 30 kHz.

### 5.1.3. Pengujian Prototipe SCA

Pengujian prototipe SCA dilakukan di Laboratorium Pengujian Elektronika PTAPB BATAN Yogyakarta. Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan hasil pengukuran cacah oleh prototipe SCA dengan hasil pencacahan SCA model 871 buatan ORTEC sebagai pembandingnya. Frekuensi masukan bersumber dari alat pulse generator Research Pulser Model 448 buatan ORTEC. Diagram blok pengujian prototipe SCA terlihat seperti Gambar 5.5.



**Gambar 5.5.** Diagram blok pengujian prototipe SCA

Pada Tabel 5.3. diperlihatkan hasil perbandingan pengujian kinerja prototipe SCA dengan SCA pembanding model 871 ORTEC. Pengujian itu dilakukan dengan memvariasi frekuensi pulsa masukan mulai dari 50 Hz. sampai 50.000 Hz. Pengujian dilakukan masing-masing lima kali.

Tabel 5.3. Hasil pengujian komparasi *prototype* SCA dengan alat pembanding model 871 ORTEC

No.	Frekuensi (Hz.)	Frek. Prototipe SCA (Hz.)				Frek. alat Pembanding SCA ORTEC (Hz.)			
		1	2	3	4	1	2	3	4
1	50	51	50	51	50	50	51	51	51
2	100	96	96	96	97	95	95	95	96
3	1.000	978	978	978	977	977	978	978	978
4	10.000	9678	9677	9678	9678	9677	9680	9683	9678
5	30.000	31637	31638	31634	31639	31631	31634	31633	31631
6	50.000	51207	51196	51197	51191	51218	51230	51238	51230

Untuk mengetahui tingkat kecocokan hasil pengukuran menggunakan protipe SCA relatif terhadap pembanding maka dilakukan uji test T berpasangan (*paired*), dimana data X adalah nilai rata-rata pengujian prototipe SCA, data Y adalah nilai rata-rata pengujian SCA pembanding (SCA ORTEC) dan data D

adalah nilai rata-rata X dikurangi nilai rata-rata Y dari masing-masing pengamatan. Seluruh data tersebut diperlihatkan pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4. Nilai rata-rata uji tes prototipe SCA dan SCA pembanding ORTEC.

no	Rata-rata SCA (X)	Rata-rata kalib (Y)	Data D
1	50,50	50,75	-0.25
2	96,00	95,00	1
3	978,00	977,75	0
4	9677,75	9679,50	-1.75
5	31637,00	31632,25	4.75
6	51197,75	51229,00	-31.25

Paired Samples Statistics						
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean	
Pair 1	VAR00001	15606.167	6	21238.74479	8670.6813	
	VAR00002	15610.750	6	21248.51501	8674.6699	

Paired Samples Correlations				
		N	Correlation	Sig.
Pair 1	VAR00001 & VAR00002	6	1.000	.000

Paired Samples Test							
		Paired Differences				t	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference		
					Lower		Upper
Pair 1	VAR00001 - VAR00002	-4.5833	13.24544	5.40743	-18.4836	9.3169	-.848

Paired Samples Test			
	df	Sig. (2-tailed)	
Pair 1	VAR00001 - VAR00002	5	.435

Gambar 5.6. Tampilan luaran uji T berpasangan (*paired*)

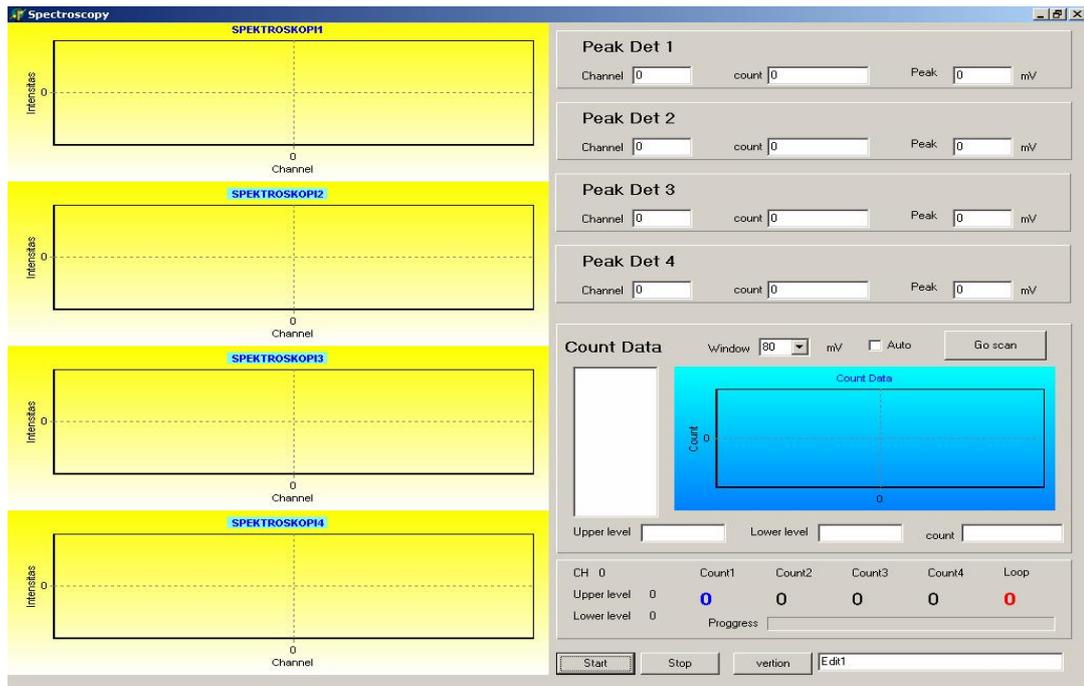
Data tersebut lalu diolah dengan program SPSS versi MS Windows XP dan hasilnya ditampilkan pada Gambar 5.6. Diperoleh hasil rata-rata X dan Y secara berturutan adalah 15606.167 dan 15610.750. Standard deviasinya untuk X dan Y secara berturutan adalah 21238.74479 dan 21248.51501. Setelah dihitung

korelasi kedua pasangan tersebut diperoleh hasil nilai korelasi 1.000. Setelah rata-rata D dan standard deviasinya dihitung diperoleh nilai berturutan -45833 dan 1324544. Dalam uji ini diasumsikan tingkat kebenarannya adalah 95% atau nilai  $\alpha = 0,05$ . Sehingga diperoleh nilai  $T_{\text{terhitung}}$  adalah -0,848. nilai ini lebih kecil dari nilai  $T_{\text{tabel}}$  sebesar 0,2015. Berdasarkan hasil tersebut dapat ditunjukkan bahwa protipe SCA yang dibuat telah sesuai dengan spesifikasi standard yang digunakan.

#### **5.1.4. Pengujian Perangkat Lunak (*Software*)**

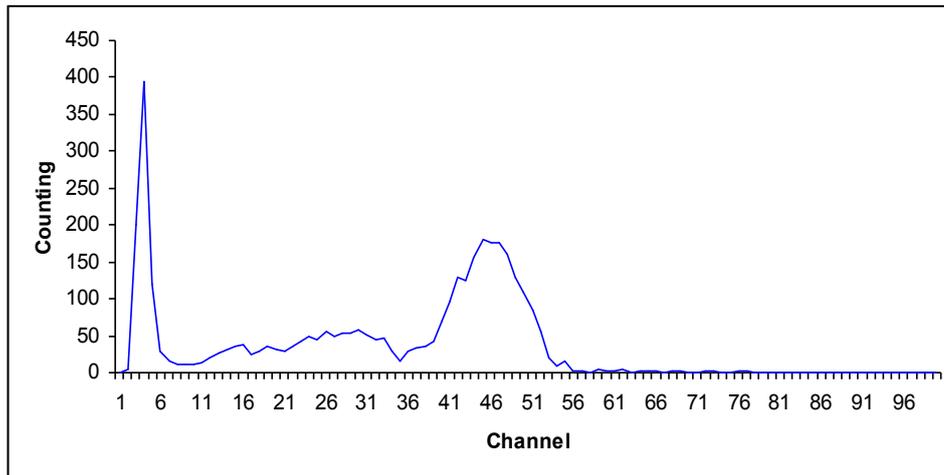
Pada penelitian ini telah dibuat dua jenis perangkat lunak yaitu perangkat lunak untuk mikrokontroler dan perangkat lunak akusisi data dan penampil spektrum. Untuk keperluan pemrograman mikrokontroler yang menggunakan bahasa tingkat rendah yang dibangun dengan bahasa pemrograman Turbo Assembler. Perangkat lunak yang disusun mengatur unit pencacah, diskriminator, pengontrol komunikasi data ke komputer dan pengaturan waktu (*timing*) pencacahan. Diskriminator berfungsi sebagai penyeleksi (*filtering*) energi foton yang diijinkan sesuai dengan pengaturan (*setting*) window. Pengaturan window yang ditentukan oleh LLD dan ULD dikontrol secara digital oleh komputer.

Untuk keperluan akusisi data dan tampilan spektrum pada layar monitor digunakan bahasa pemrograman tingkat tinggi Borland Delphi 6.0. Tampilan program Borland Delphi 6.0 untuk akusisi data diperlihatkan pada Gambar 5.7. *Listing* program Turbo Assembler dan Borland Delphi 6.0 disajikan pada Lampiran A.



**Gambar 5.7.** Tampilan program akuisisi data Borland Delphi 6.0.

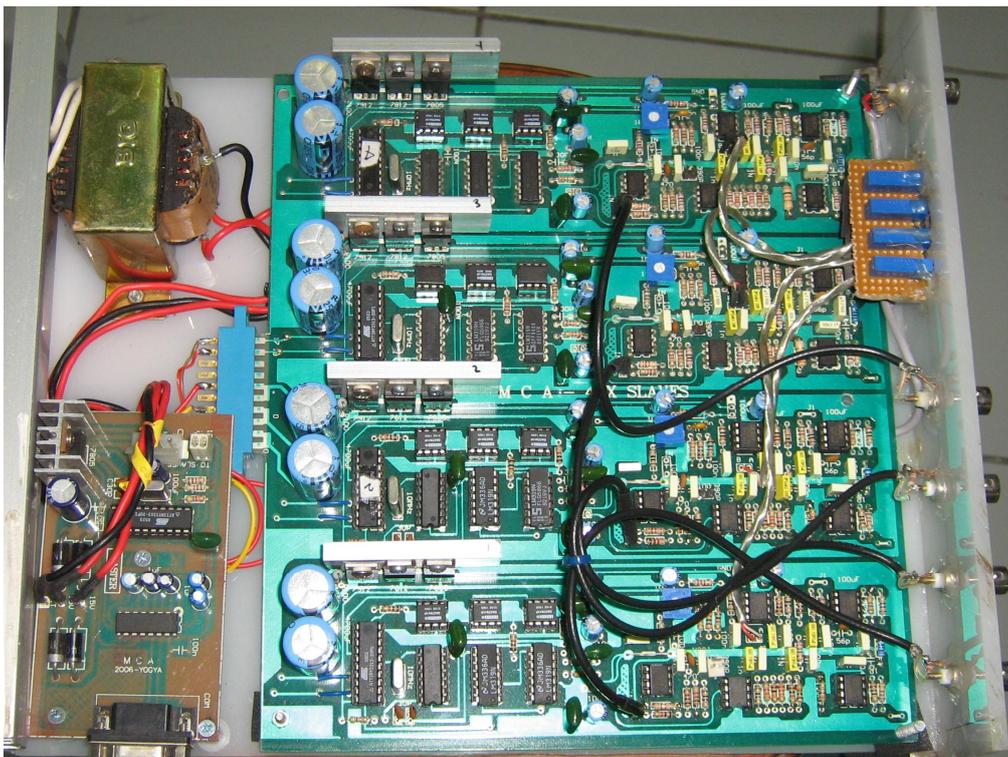
Pada Gambar 5.7. ditunjukkan saat mengawali pengoperasian perangkat lunak akuisisi data dan penampil spektrum. Tampak upper level (ULD) dan lower level (LLD) diset 0 mV, sedangkan window diset 80 mV. Pada saat operasi spektroskopi lebar window tetap 80 mV namun ULD dan LLD berubah sedemikian sehingga selisih ULD dan LLD tetap 80 mV. Contoh hasil spektroskopi (spektrum) suatu sumber radiasi Cs-137 diperlihatkan seperti Gambar 5.8. Sumbu mendatar menyatakan kanal energi dengan nomor kanal menunjukkan urutan window. Lebar setiap window adalah 80 mV. Sumbu vertikal menyatakan jumlah cacah radiasi perdetik atau jumlah pulsa hasil konversi sinyal-sinyal yang masuk diantara ULD dan LLD. Dari spektrum itu dapat ditunjukkan adanya suatu puncak energi di sekitar kanal 46.



**Gambar 5.8.** Contoh spektrum radiasi nuklir Cs-137, hasil dari pengujian perangkat lunak.

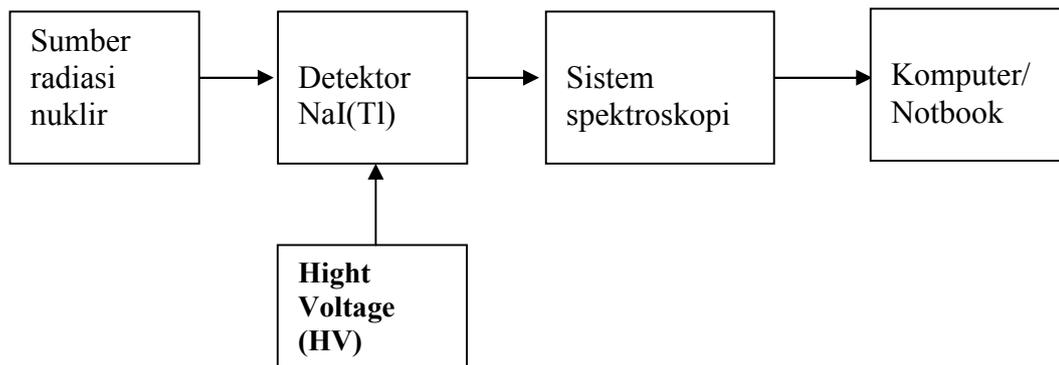
## 5.2. Pengujian Sistem Spektroskopi Radiasi Nuklir Multi-detektor

Setelah rangkaian-rangkaian komponen penyusun sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor diuji dan menghasilkan hasil sesuai dengan keinginan maka keseluruhan sistem dirangkai menjadi satu dengan nama alat spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor. Alat tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.9.

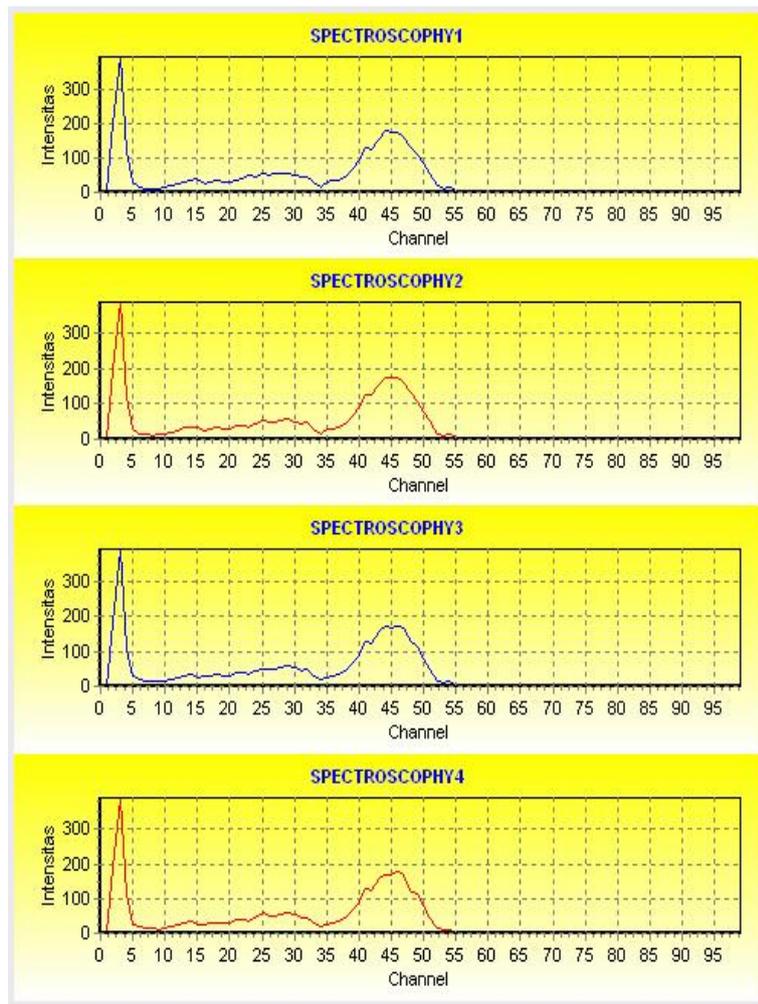


**Gambar 5.9.** Foto alat sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor

Pengujian paling akhir yang dilakukan adalah pengujian sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor secara keseluruhan. Pengujian dilakukan di Laboratorium Citra FMIPA UGM Yogyakarta. Diagram blok pengujian sistem spektroskopi radiasi nuklir multi detektor diperlihatkan pada Gambar 5.10. Sumber radiasi Cs-137 dipancarkan sehingga mengenai detektor NaI(Tl). Detektor NaI(Tl) telah diberikan tegangan bias HV. Kemudian keluaran dari detektor dimasukan ke dalam sistem buffer seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3 sehingga diperoleh empat keluaran yang sama. Keempat keluaran tersebut lalu dimasukan ke dalam sistem multi-detektor.



**Gambar 5.10.** Blok diagram pengujian sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor



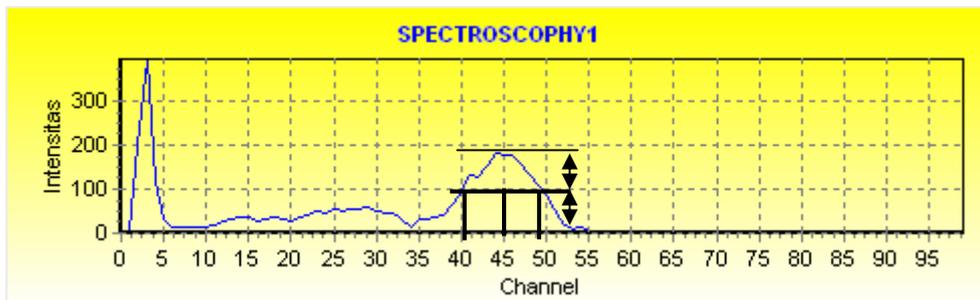
**Gambar 5.11.** Tampilan hasil pengujian spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor

Hasil pengujian sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor diperlihatkan pada Gambar 5.11. Berdasarkan spektrum-spektrum yang dihasilkan seperti pada Gambar 5.11. tampak bahwa pola keempat spektrum relatif sama. Posisi kanal puncak, lebar kanal puncak, luasan spektrum dan jumlah cacah pada tiap kanal relatif serupa. Uji kemiripan spektrum dilakukan dengan menghitung korelasi antar spektrum dengan spektrum SCA1 sebagai acuan. Seluruh data spektrum SCA1, SCA2, SCA3 dan SCA4 ditampilkan pada Lampiran B. Hasil uji korelasi ditampilkan pada Tabel 5.5.

Tabel 5.5. Nilai koefisien korelasi linear untuk keempat SCA

No.	Koefisien korelasi linear (SCA2)	Koefisien korelasi linear SCA3	Koefisien korelasi linear SCA4
1	0,9994	0,9983	0,9983

Nilai FWHM untuk puncak spektrum yang bersesuaian dengan puncak tenaga 662 keV adalah 17,7 % . Angka ini diperoleh dari persentasi perbandingan antara lebar setengah puncak sebesar 8 kanal dibagi dengan posisi kanal pada puncak spektrum yaitu kanal 45. Contoh cara menghitung spektrum seperti Gambar 5.12.



**Gambar 5.12.** Spektrum radiasi nuklir multi-detektor

## **BAB VI**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **6.1. Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan ini, disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

- a) Perangkat sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor yang berupa multi-SCA beserta sistem akuisisi datanya telah berhasil dibuat dan dapat berfungsi dengan baik untuk tujuan melakukan analisis spektroskopi radiasi nuklir, khususnya radiasi gamma. Sistem yang disusun secara prinsip dapat mengakomodasi 127 detektor, walaupun dalam penelitian ini hanya menyelesaikan sistem multi-detektor untuk empat buah detektor saja.
- b) Profil spektroskopi radiasi gamma yang dideteksi dengan sistem spektroskopi multi-detektor yang dibuat telah mampu menunjukkan bentuk spektrum, kanal energi, energi puncak dan intensitas cacah radiasi nuklir pada kanal tertentu yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa untuk keempat SCA sebagai model dari pada sistem multi-detektor yang dikembangkan dalam penelitian ini telah terbukti memiliki kinerja yang sama dengan rata-rata koefisien korelasi  $0,999 \pm 0,001$ .
- c) Hasil uji perbandingan profil spektrum spektroskopi radiasi sinar gamma yang berasal dari Cs-137 yang dideteksi oleh perangkat sistem multi-detektor yang telah dibuat menunjukkan kesesuaian yang sangat signifikan terhadap profil spektrum spektroskopi yang dideteksi menggunakan sistem buatan ORTEC yang umum dipakai di Jurusan Fisika FMIPA UGM.

#### **6.2. Saran**

Pengembangan dan pemanfaatan hasil penelitian ini diharapkan dapat ditingkatkan melalui:

- a) Melakukan pengembangan terhadap sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor untuk lebih dari 4 detektor untuk spektroskopi gamma dan melakukan uji kinerjanya.
- b) Melakukan pengembangan terhadap uji kinerja sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor untuk radiasi nuklir selain radiasi gamma yaitu alfa, beta dan sinar-x.

- c) Melakukan penelitian dan pengembangan lanjutan yang berkaitan dengan pemanfaatan sistem spektroskopi radiasi nuklir multi-detektor untuk aplikasi *CTScanner*, *Renograph*, dan *Thyroid Uptake*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al-Haddad, M.N., Lin C., Miller W.H., Berliner R.R. , 1994, "Development and Testing of a Flash Analog-to-Digital Converter Based System for Pulse Shape Discriminator of Nuclear Radiation Pulse", *IEEE Transactions on nuclear Science*, vol. 41 No. 5, pp. 1765-1769
- ATMEL Corporation, 1998, *Data sheet AVR Microcontroller Attiny2313A*, [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/8246S.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/8246S.pdf), akses tanggal 24 Februari 2010
- Beiser, A. , 1987, *Concept of Modern Physics*, Terjemahan: Liong T.H, 1990, *Konsep Fisika Modern*, PT. Erlangga, Jakarta.
- Boylestad, R. and Nashelsky, L., 1982. *Electronic Devices and Circuit Theory*, Prentice-Hall Inc.
- Burr-Brown Corporation, 1997, *Data sheet 12-Bit Serial Input Digital-To-Analog Converter*, <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/dac7611.pdf>, akses tanggal 24 Februari 2010.
- Burr-Brown Corporation, 1998, *Data sheet High Precision, Low Noise Operational Amplifiers* , <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa227.pdf>, akses tanggal 3 Maret 2010.
- Delchar, T.A., 1997, *Physics in Medical Diagnosis*, Chapman and Hall, London.
- Dewi, S. I. R., 2008, "Spektrometer gamma gamaspektra yang menggunakan detektor CsI(Tl)", *Skripsi S-I*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Farsoni, A.T. and Hamby, D.M., 2007, "A system for simultaneous beta and gamma spectroscopy", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 578, pp 528–536
- Hien, D.S. and Senzaki, T. , 2001, "Development of a fast 12-bit ADC for a nuclear spectroscopy system", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 457, pp 356-360.
- Jiwatami, A. M. A., 2008, "Spektrometer gamma gamaspektra yang menggunakan detektor NaI(Tl)", *Skripsi S-I*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Lund, J. C. , Hilton, N. R. , McKisson, J. E., Van Scyoc, J. M. , Brunett, B. A., Hermon, H. and James, R. B. , 1998, "Gamma-ray imaging and spectroscopy system using room-temperature semiconductor detector elements", *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, vol. 233 , pp. 177-184
- ORTEC, 1976, <http://www.Ortec-Online.com>, akses tanggal 24 Juli 2004
- Nugroho, W., 2004, "Metoda pengukuran sensitivitas perangkat tomografi komputer", *Tesis S-2*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Rahim, R.A., Leong, L.C., Chan, K.S., Rahiman, M.H., and Pang, J.F., 2008,

- “Real time mass flow rate measurement using multiple fan beam optical tomography”, *ISA Transaction*, Vol. 47, pp. 3-14.
- Suastika, K. G., 2009, "Sistem tomografi kombinasi transmisi dan emisi sinar gamma dual energi", *Disertasi S-3*, Universitas Airlangga, Surabaya.
- Sapuan, I. , 2004, "Rancang bangun single channel analyzer untuk sistem tomografi komputer", *Tesis S-2*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Suparta, G.B., 1999, "Focussing Computed Tomography Scanner", *Disertasi S-3*, Monash University, Victoria, Australia.
- Suparta, G.B., 2000, "Perangkat tomografi komputer untuk laboratorium", *Laporan Penelitian*, Lembaga Penelitian UGM, Yogyakarta.
- Suparta, G.B., Kusminarto dan Nugroho, W., 2000, "Tomografi Komputer untuk laboratorium", *Prosiding*, SFN XVIII, Himpunan Fisika Indonesia, Serpong, 25-27 April.
- Susetyo, W. , 1988, *Spektrometri Gamma dan Penerapannya dalam Analisis Pengaktifan Neutron*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Swakarma, I K. dan Suparta, G. B., 2005, "Perangkat kompak penganalisa kanal tunggal", *Proceedings*, 3<sup>rd</sup> Ketingan physics forum Universitas Sebelas Maret, Solo.
- Texas Instruments Incorporated, 1979, *Data sheet Quad Differential Comparators LM139*, <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/lm139.pdf>, akses tanggal 3 Maret 2010.
- Treede, H., Becker, C., Reichenspurner, H., Knez, A., Detter, C., Reiser, M. and Reichart, B., 2002, “Multidetector computed tomography (MDCT) in coronary surgery: first experiences with a new tool for diagnosis of coronary artery disease”, *The Annal Thoracic Surgery*, vol. 74, pp. 1398-1402
- Wang, W. H., 2003, “The Operational Characteristics of a Sodium Iodide Scintillation Counting System as a Single-Channel Analyzer”, *Radiation Protection Management*, Vol. 20, No. 5, pp. 28-31.
- Wells, P., Smith, R. and Suparta, G.B., 1997, "Sampling the sinogram in computed tomography", *Materials Evaluation*, 55(7), 772-776.
- Widodo, C.S., Kusminarto dan Suparta, G.B., 2000, "Parameter deteksi panjang untuk pengukuran sensitivitas sistem tomografi komputer", *Prosiding*, SFN XVIII, Himpunan Fisika Indonesia, Serpong, 25-27 April.
- Widyatmika, I P., 2003, "Unjuk kerja sistem tomografi komputer berbasis detektor referensi", *Tesis S-2*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.