

Pusparagam dalam TIKPF0000.pdf

20 ***Pusparagam***
Teknologi Informasi dan Komunikasi dalam
Pembelajaran Fisika

~ Ishafit ~



Laboratorium Teknologi Pembelajaran Sains
FKIP | Universitas Ahmad Dahlan

Pusparagam Teknologi Informasi dan Komunikasi dalam Pembelajaran Fisika

Ishafit

© Hak Cipta 2016 pada penulis,
Hak cipta dilindungi undang-undang. Tidak diperbolehkan memperbanyak beberapa bagian
maupun seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, tanpa izin tertulis dari penerbit.

Sampul

Mustofa Ahyar

Tata Letak

Toni Kus Indratno

33 akan Pertama, Oktober 2016

Perpustakaan Nasional, Katalog dalam Terbitan (KDT)

Ishafit.

Pusparagam Teknologi Informasi dan Komunikasi dalam Pembelajaran Fisika
Yogyakarta: Lab. Teknologi Pembelajaran Sains UAD

2016

viii + 126 hlm.; 17,5 cm x 24 cm

ISBN: 978-602-17035-7-1

Penerbit



Laboratorium Teknologi Pembelajaran Sains

FKIP I Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta

Kampus 3 Sayap Utara, Jl. Prof. Dr. Soepomo, SH, Janturan, Warungboto, Yogyakarta

Pondok maya: <http://ltps.uad.ac.id>, surat-e: ltps@uad.ac.id

Dipersembahkan kepada istri dan putra-putri tercinta
Budi Utami
Miftah Al-Ilmi Hafidz, Khusnul Fadhilah, Farah Dina Aqila
dan kepada seluruh pejuang pendidikan di Indonesia

Sekapur Sirih

29

Kemajuan zaman yang memasuki era generasi Z (zi, red), memaksa kita untuk bijak dalam menyikapi perkembangan Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK) yang teramat pesat. Terlebih bagi kita yang bekerja di sektor pendidikan. Menghadapi anak era ini membutuhkan keterampilan tersendiri, baik dalam metode dan teknik pembelajaran. Mengingat generasi ini adalah generasi yang pertumbuhannya didampingi oleh teknologi dalam setiap inci aktivitasnya.

Penetrasi TIK dalam aktivitas belajar mengajar merupakan suatu keharusan, agar guru mampu menghadirkan pengalaman belajar baru untuk para siswa. Degan hadirnya TIK, seyogyanya bisa membantu kesenjangan yang dialami guru tatkala menyampaikan materi pembelajaran.

Buku ini merupakan kumpulan artikel ilmiah hasil penelitian tentang penerapan TIK dalam pembelajaran, khususnya pebelajaran fisika. Dalam buku ini ditampilkan eksperimen fisika sederhana yang dilakukan dengan bantuan TIK. Mulai dari penggunaan perangkat lunak yang *opensource* dan sederhana sampai yang berbayar. Selain itu juga disokong dengan apaparatus eksperimen yang mudah untuk didapatkan.

Artikel ilmiah dalam buku ini memang telah diseminarkan di berbagai pertemuan ilmiah, namun penulis ingin menyatukan artikel-artikel tersebut menjadi sebuah kolase bertajuk *Pusparagam Teknologi Informasi dan Komunikasi dalam Pembelajaran Fisika*. Penulis berharap, buku ini bisa menjadi *stimulus* untuk para sivitas akademika untuk selalu menghadirkan TIK dalam aktivitas pembelajaran baik di sekolah maupun di perguruan tinggi.

Hasil riset pendidikan fisika menunjukkan bahwa pembelajaran fisika akan bermakna apabila pembelajaran diawali oleh hal yang nyata kemudian menuju ke

abstrak, yaitu menghubungkannya dengan dunia nyata serta penjelasan konsepnya, dan baru kemudian memberikan nama atau definisi. TIK mampu dijadikan sebagai jembatan untuk membuat hal yang abstrak tersebut menjadi nyata, melalui sebuah pemodelan.

Beberapa artikel dalam buku ini tidak ditulis sendiri oleh penulis, ada beberapa bagian yang ditulis bersama dengan kolega, dosen pembimbing, dan mahasiswa bimbingan. ²¹ Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan terimakasih yang setulus-tulusnya kepada mereka yang telah ambil bagian dalam upaya penetrasi TIK dalam pembelajaran fisika. Akhirnya, segenap puji bagi Allah Yang Mahatinggi. Seribu satu salam untuk Muhammad *Shalallahu'alaihi wa sallam*. Semoga buku ini bermanfaat di atas segenap kekurangannya.

Yogyakarta, 10 Oktober 2016

Penulis

Daftar Isi

Sekapur sirih	v
Daftar Isi	vii
Pemanfaatan Potensi Microsoft Office Excel dalam Pendidikan Fisika	1
Teknologi Informasi dan Komunikasi Dalam Pembelajaran Fisika: Komputerisasi Eksperimen Bunyi Berbasis <i>Soundcard</i> Laptop	11
Inovasi Pembelajaran Fisika Dengan <i>Video Based Laboratory</i> (VBL): Studi Kasus Pembelajaran Gerak Harmonik Sederhana	23
<i>Video Based Laboratory</i> sebagai Media Pengembangan Keterampilan Interpretasi Grafik Kinematika	37
Pengukuran Frekuensi Tangga Nada Instrumen Musik dengan Sistem <i>Microcomputer Based Laboratory</i>	49
Eksperimen Efek Doppler Dari Sumber Bunyi Bergerak Lurus dengan Sistem <i>Multimedia Based Laboratory</i>	63
Penentuan Konstanta Planck Menggunakan LED Berbasis <i>Microcomputer Based Laboratory</i>	73
Pencocokan Data ke Polinomial Pangkat dan Legendre dengan Matlab	85
Studi Komparasi Metode “Unfolding” dalam Spektroskopi Nuklir	95
Program Komputer Slop untuk Unfolding Spektrum Energi Neutron	107
Program Komputer Unfolding untuk Spektroskopi Neutron Cepat	117

PEMANFAATAN POTENSI MICROSOFT OFFICE EXCEL DALAM PENDIDIKAN FISIKA

Ishafit

Intisari - Pemanfaatan potensi Microsoft Office Excel (Ms-Excel) untuk perhitungan dan visualisasi di bidang fisika dan pendidikan fisika telah dibahas di dalam makalah ini. Dalam bidang fisika, Ms-Excel dimanfaatkan untuk proses komputasi fisika dengan metode numerik dan pembuatan grafik yang memerlukan tampilan *error-bar*. Sedangkan di dalam bidang pendidikan dan pengajaran fisika, Ms-Excel dimanfaatkan sebagai alat bantu dalam proses maupun evaluasi pembelajaran fisika. Selain itu, Ms-Excel juga dimanfaatkan sebagai bahan ajar program komputer bagi mahasiswa pendidikan fisika untuk topik aplikasi pengolahan nilai, penyajian dan analisis data eksperimen fisika, simulasi gejala fisika, dan pengenalan metode numerik.

Abstrack - The use of Microsoft Office Excel (Ms-Excel) potency for computation in physics and physics education has been explained in this paper. In physics field, Ms-Excel has been used to numerical methods of physics computation process and design of graphics which are error-bar equipped. Whereas, in physics education and teaching field, Ms-Excel has been used as assisted learning process and evaluation. Besides, Ms-Excel has been also used as teaching material of computer program for student of physics education in topics application as evaluation process, representation and analysis of physics experimental data, simulation of physics phenomena, and introduction of numerical methods.

A. Pendahuluan

Microsoft Excel (Ms-Excel) merupakan paket program komputer untuk aplikasi perhitungan dengan tabel dan grafik. Dalam penerapannya, Ms-Excel tidak hanya diterapkan di bidang bisnis, tetapi sudah memasuki bidang sains dan teknologi. Hal ini dimungkinkan karena Ms-Excel memiliki banyak formula dan fungsi yang diperlukan untuk melakukan perhitungan umum maupun khusus terhadap data-data numerik. Fasilitas grafik yang dimiliki Ms-Excel akan mampu mendukung penyajian data dalam sains dan teknologi. Ms-Excel memiliki kemampuan pemrograman melalui bahasa makronya, yang disusun dengan menggunakan *Visual Basic for Application* (VBA). Dengan bahasa makro, Ms-Excel menyediakan fasilitas bagi pengguna untuk menyusun program-program aplikasi yang lebih kompleks seperti layaknya menyusun program komputer dengan menggunakan bahasa-bahasa pemrograman.

Dengan kemampuan yang dimilikinya, Ms-Excel berpotensi untuk mendukung pengajaran fisika. Ms-Excel tidak hanya digunakan sebagai alat bantu pengajaran dalam matakuliah tertentu, akan tetapi Ms-Excel dapat digunakan sebagai bahan ajar pada matakuliah program komputer yang telah masuk dalam kurikulum pendidikan fisika. Pengajaran fisika saat tidak hanya menyangkut aspek teoritik dan eksperimental, tetapi sudah meliputi aspek komputasional (penyelesaian masalah perhitungan dengan komputer). Aspek komputasional ini sendiri akan mendukung pengajaran fisika dalam aspek teoritik maupun eksperimental (laboratorium) ^[1].

Keterampilan penggunaan komputer merupakan salah satu keahlian yang saat ini perlu dimiliki oleh mahasiswa di bidang sains (fisika). Hal ini sejalan dengan perkembangan pengajaran fisika yang tidak hanya meliputi aspek teoritis dan eksperimental, tetapi sudah berkembang dengan memasukkan aspek komputasional. Aspek komputasional diperlukan dalam mengembangkan kemampuan penyelesaian masalah (*problem solving*) fisika oleh mahasiswa. Dari pengamatan King, dkk, sebagaimana dikutip oleh Witkov^[2] disimpulkan bahwa penguasaan terhadap pemrograman komputer dapat meningkatkan kemampuan penyelesaian masalah

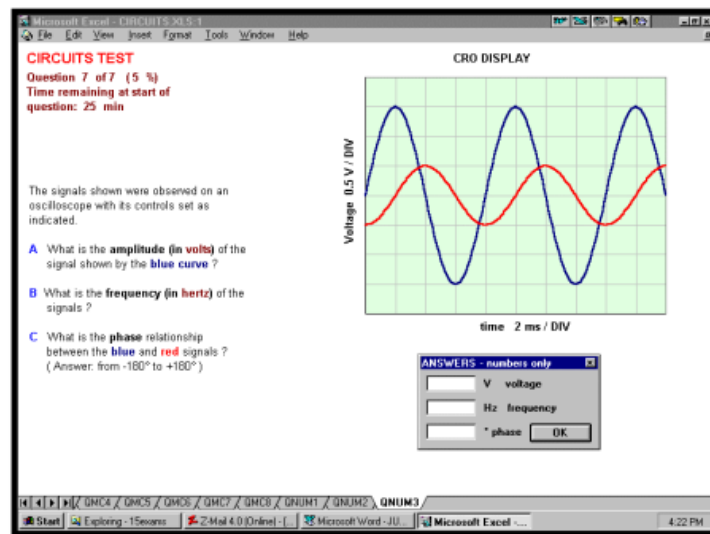
(*problem-solving abilities*). Kemampuan penyelesaian masalah dapat berkembang mengingat komputer di bidang fisika berperan dalam analisis numerik, manipulasi simbolik, simulasi, pengumpulan dan analisis data, dan visualisasi^[3]. Bagi mahasiswa pendidikan fisika, keterampilan penggunaan komputer diperlukan pula untuk mendukung keahliannya dalam bidang didaktik dan metodik fisika.

Pengembangan keterampilan penggunaan dan pemrograman komputer bagi mahasiswa pendidikan fisika dapat diawali dengan mengarahkannya ke pemilihan keahlian pada paket program komputer aplikasi. Setelah itu, mahasiswa diarahkan untuk menguasai pemrograman komputer, dengan menggunakan bahasa pemrograman (*programming language*). Paket program komputer aplikasi yang berpotensi untuk keperluan ini adalah Ms-Excel. Ms-Excel dapat digunakan sebagai *super calculator* dan *graphing tool*. Ia dapat digunakan sebagai *mathematical tools* dalam analisis statistik dan analisis numerik seperti mencari akar persamaan kuadrat, analisis Fourier, operasi bilangan kompleks, perhitungan matriks, dan penyelesaian persamaan diferensial. Satu hal yang menarik dari penggunaan Ms-Excel ialah ia dapat digunakan bersama-sama dengan VBA (*Visual Basic Application*) yang terinstalasi di dalamnya. Dengan VBA, keterampilan pemrograman yang dibutuhkan oleh mahasiswa dalam komputasi tingkat lanjut, seperti komputasi dalam mekanika kuantum, dapat dikembangkan^[4].

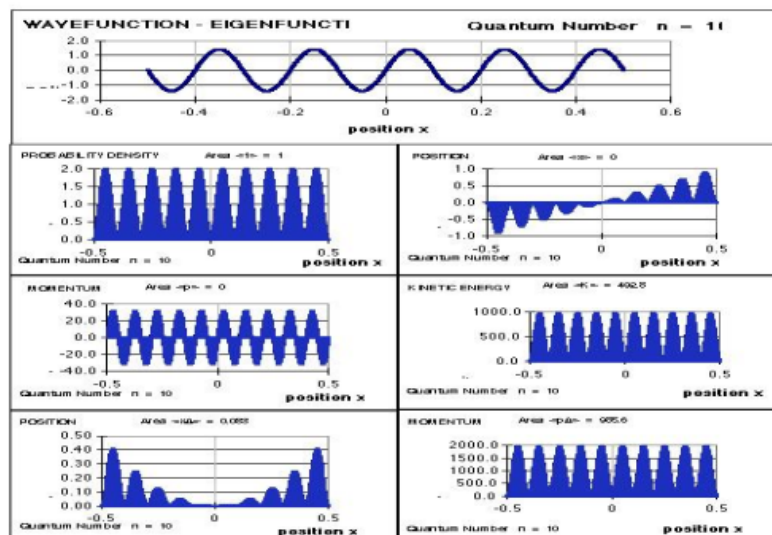
Makalah ini membahas tentang pemanfaatan atau penggunaan Ms-Excel dalam fisika dan pendidikan fisika. Pada bagian II dari makalah ini disajikan beberapa contoh pemanfaatan Ms-Excel dalam komputasi dan visualisasi (pembuatan grafik) untuk bidang fisika maupun pendidikan, yang merupakan hasil eksplorasi internet dengan kata kunci *spreadsheet physics*. Contoh pemanfaatan Ms-Excel, yang dikembangkan penulis, sebagai bahan ajar program komputer untuk mahasiswa Program Studi Pendidikan Fisika disajikan pada bagian III dari makalah ini.

B. Penggunaan Ms-Excel dalam Fisika dan Pendidikan

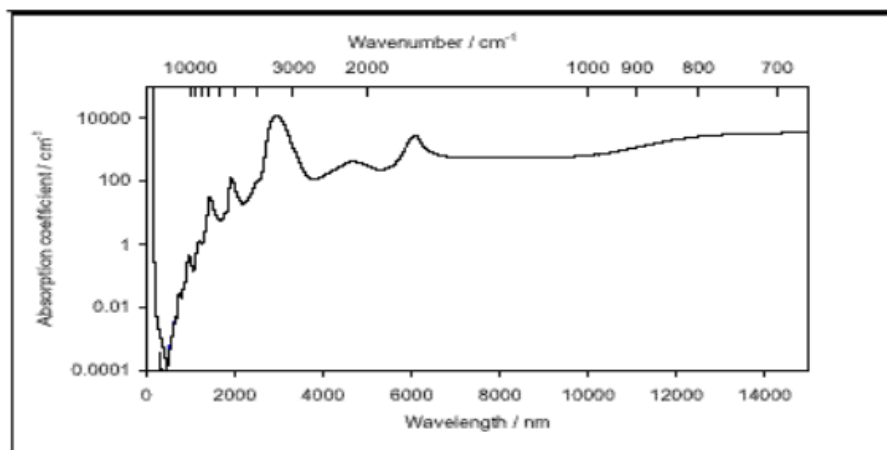
Pada proses belajar dan mengajar fisika, Ms-Excel berperan dalam penyusunan evaluasi perkuliahan teori maupun kegiatan praktikum. Contoh penggunaan Ms-Excel dalam evaluasi kegiatan praktikum di laboratorium, yang dikembangkan oleh Cooper dengan istilah *Computer Based Assessment* (CBA) ^[1], disajikan pada gambar 1.1. Grafik dalam gambar 1.2 adalah contoh tampilan fungsi gelombang dari penyelesaian persamaan Schrodinger yang diselesaikan dengan Ms-Excel ^[4].



Gambar 1.1. Contoh Tes Kegiatan Laboratorium untuk Topik Kelistrikan



Gambar 1.2. Visualisasi Fungsi Gelombang dari Persamaan Schrodinger



Gambar 1.3. Contoh Grafik Spektrum Elektromagnetik dalam Air

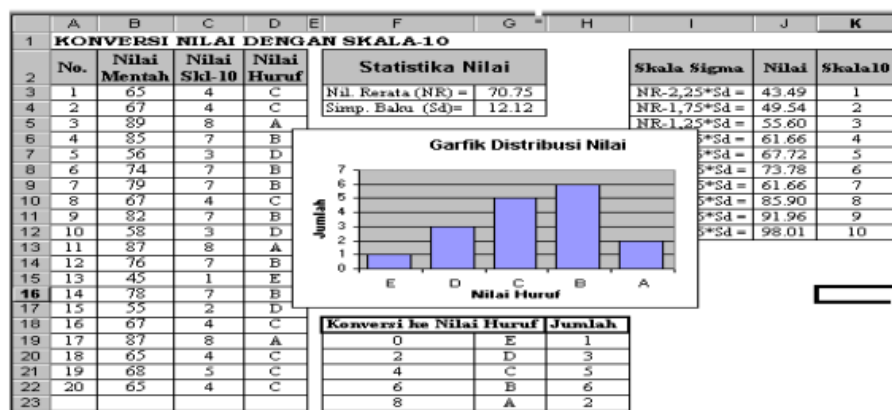
Kemampuan komputasi dan grafik dari Ms-Excel telah dimanfaatkan pula untuk membuat grafik sains berkualitas tinggi dalam belajar mengajar di universitas dan dunia riset. Grafik pada gambar 1.3 adalah salah satu contoh garfik sains yang dibuat dengan memanfaatkan fasilitas *error bar* Ms-Excel ^[5]. Kemampuan grafik Ms-Excel juga digunakan dalam pengembangan materi pengajaran fisika kuantum pada project *A New Model Course in Applied Quantum Physics* oleh Redish, dkk. ^[6]. Dalam WTools (*Work Shop Physics Tools*) yang dikembangkan oleh Dickinson College, Ms-Excel digunakan pada pelaksanaan kurikulum sains berbasis laboratorium, yaitu sebagai *Formulas Translator Tool* dan *Fitting Polynomial Function to Experimental Data* ^[7].

Beberapa pemanfaatan Ms-Excel dalam bidang fisika dapat ditemui pada artikel-artikel berikut ini, yaitu: *Archimedes' Law and Potensial Energy: Modeling and Simulation with a Spreadsheet* ^[8], *Spreadsheet Analysis of Fluid Mechanics Problem* ^[9], *ActiveSheets: Super-Computing with Spreadsheet* ^[10], *Teaching Aid for Remote Sensing and Map Imagery Analysis Using Excel Spreadsheet and VBA* ^[11], *Nonlinear Parameter Estimation Using Spreadsheet Software* ^[12], *Solving Partial Differential Equation Using Excel 2000* ^[13], dan *Spreadsheet Solution to Two-Dimensional Heat Transfer Problem* ^[14].

C. Penggunaan Ms-Excel Dalam Pengajaran Komputer untuk Pendidikan Fisika

Mengacu pada tinjauan terhadap kemampuan dan fasilitas yang dimiliki oleh Ms-Excel dan tinjauan terhadap pemanfaatannya dalam fisika dan pendidikan, penulis telah mencoba mengembangkan materi ajar program komputer dengan Ms-Excel dalam matakuliah “Program Komputer” di Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Ahmad Dahlan. Berikut ini disajikan beberapa contoh topik pengajaran Ms-Excel untuk mahasiswa program studi pendidikan fisika, yang meliputi penerapan untuk pengolahan nilai, penyajian dan pengolahan data eksperimen fisika, simulasi fisika, dan dasar-dasar metode numerik.

1. Pengelolaan Nilai



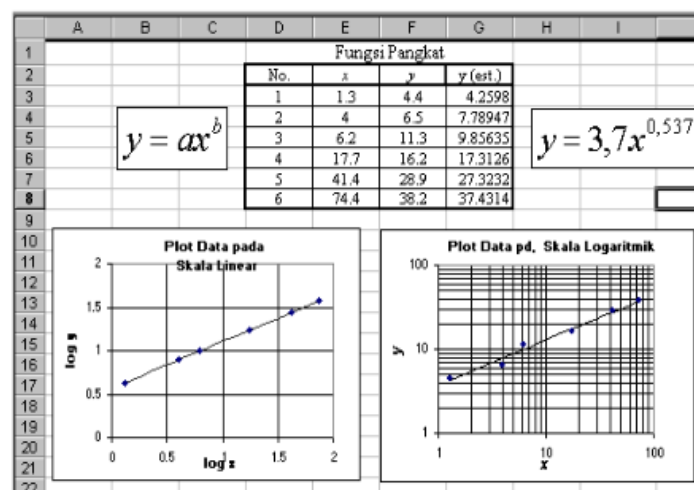
Gambar 1.4. Contoh Grafik Spektrum Elektromagnetik dalam Air

Dengan kemampuan fungsi statistika dan konversi dengan referensi (fungsi **LOOKUP**)^[15], Ms-Excel memudahkan proses pengolahan nilai dalam pembelajaran fisika. Contoh tampilan pengolahan nilai dengan skala-10 dari Ms-Excel disajikan pada gambar 1.4.

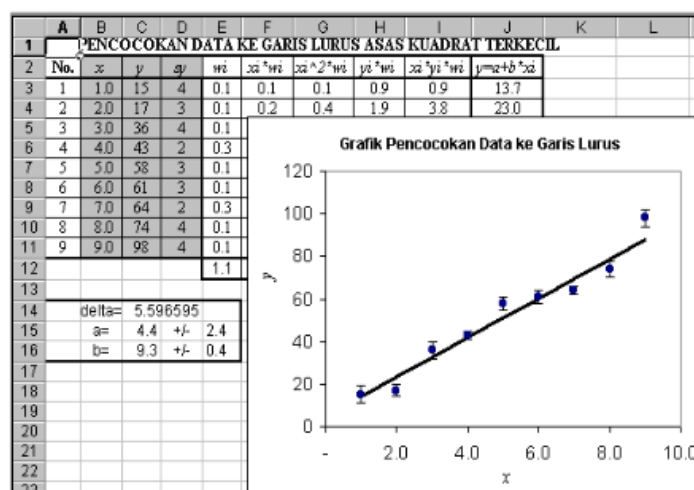
2. Penyajian dan Pengolahan Data Eksperimen

Gambar 1.5 adalah contoh tampilan pemanfaatan Ms-Excel untuk penyajian data eksperimen fisika secara grafik, yang memerlukan fasilitas skala linear dan

logaritmik. Sedangkan gambar 1.6 adalah contoh tampilan pemanfaatan Ms-Excel dalam pencocokan data eksperimen fisika ke polynomial.



Gambar 1.5. Contoh Penyajian Data dengan Garfik Skala Linear dan Logaritmik

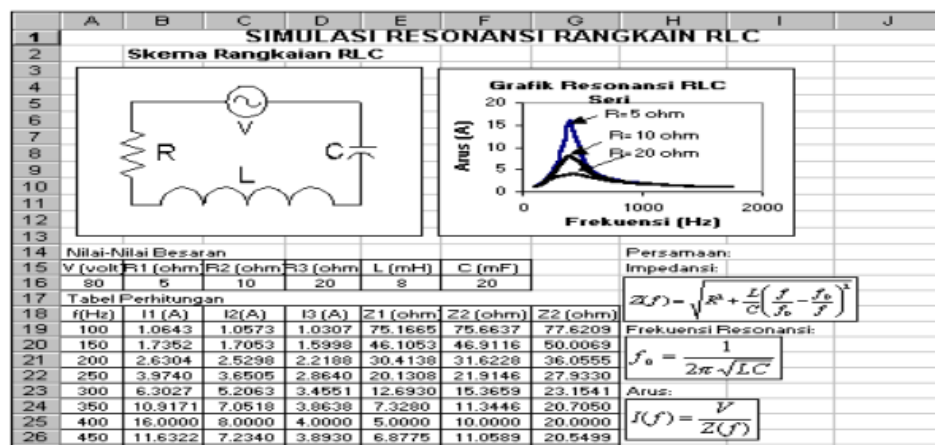


Gambar 1.6. Keluaran Hasil Analisis Pencocokan Data ke Polinomial

3. Simulasi Fisika

Dengan sistem sel aktif yaitu perubahan nilai dalam satu sel akan diikuti oleh perubahan nilai dalam sel lain yang nilainya terkait dengannya, termasuk juga keluaran grafiknya, maka Ms-Excel dapat digunakan untuk simulasi gejala fisika.

Gambar 1.7 adalah contoh simulasi gejala resonansi rangkaian RLC. Grafik resonansi akan secara otomatis berubah jika nilai R, L, atau C divariasikan.

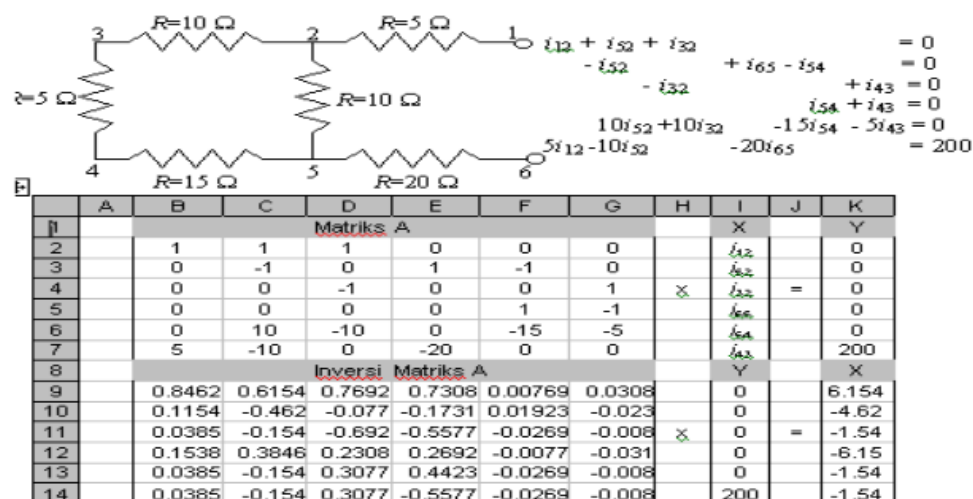


Gambar 1.7. Tampilan Simulasi Resonansi Rangkaian RLC

4. Komputasi Numerik

a. Penyelesaian Persamaan Simultan

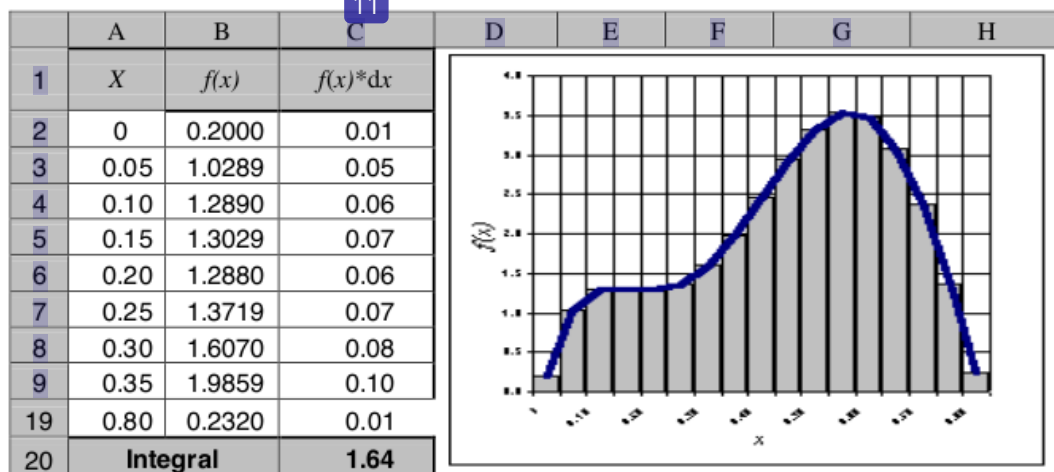
Pengenalan metode numerik untuk penyelesaian persamaan simultan dengan metode matriks cukup mudah dilakukan dengan menggunakan fungsi **MINVERSE** (fungsi inversi matriks) dan fungsi **MMULT** (fungsi perkalian matriks)^[15] yang tersedia dalam Ms-Excel. Tampilan dari contoh penerapannya disajikan pada gambar 1.8.



Gambar 1.8. Contoh Penyelesaian Persamaan Simultan dari Rangkaian Listrik dengan MS-Excel

b. Pengintegralan Numerik

Pengajaran metode pengintegralan numerik dengan mudah dilakukan dan divisualkan melalui Ms-Excel. Gambar 1.9 adalah contoh pengintegralan numerik dengan pendekatan empat persegi panjang.



Gambar 1.9. Tampilan pengintegralan numerik

D. Kesimpulan

Potensi perhitungan dan visualisasi yang dimiliki oleh Ms-Excel bermanfaat dalam bidang fisika untuk proses komputasi, simulasi, dan penyajian grafik sains berkualitas tinggi. Dalam bidang pendidikan fisika, Ms-Excel bermanfaat dalam penyusunan bahan ajar aplikasi program komputer dan alat bantu pengajaran fisika dalam aspek teoritis maupun eksperimental.

E. Pustaka

- [1] Cooper, I., Computer Based Assessment (CBA) in The First Year Laboratory.
<http://www.physics.usyd.edu.au/uniserve/cooper1.html>
- [2] Witcov, C., Can Computer Programming Exercise Improve the Performance of Physics Student?, Broward Community College Nort Campus.
- [3] Gould, H., et.al., 2001, *Simulation in Physics*.
- [4] Cooper, I., A Strategi for Teaching Physics to First and Second Year Student by Computational and Numerical Methods.
<http://www.physics.usyd.edu.au/uniserve/cooper3.html>

- [5] 14 25, K. F., Some Unusual Application of The "Error Bar" Feature in Excel Spreadsheets, School of Biological and Chemical Sciences, Deakin University, Australia.
- [6] Redish, E.F., et.al., A New Model Course in Applied Quantum Physics.
<http://www.physics.umd.edu/perg/qm/qmcourse>
- [7] 5 aught, G., 1997, *The Workshop Physics Tools Version 5.1.*, Dickinson College.
- [8] Silva, A.A., 1998, "Archimedes' Law and Potensial Energy: Modeling and Simulation with a Spreadsheet", *Phys. Educ.* 33(2).
- [9] 1 mar, R., and Al-Shantaf, A.O., *Spreadsheet Analysis of Fluid Mechanics Problem*, Department of Engineering Technology, University of North Texas, Denton TX 76203.
- [10] Abramsom, D., et.all., ActiveSheet: Super-Computing with Spreadsheet, School of Computer Science and Software Engineering, Monash University, Clayton VIC 3168, Australia.
- [11] Sato, K, and Yokoyama, R., 2001, *Teaching Aid For Remote Sensing and Map Imagery Analysis Using Excel Spreadsheet and VBA*, Ichinoseki National College of Technology, Japan.
- [12] Wraith, J.M., and Or, D., 1998, "Nonlinear Parameter Estimation Using Spreadsheet Software", *J. Nat. Resour.Life Sci. Educ.* Vol. 27.
- [13] Rosen, E.M.. Reprise: Solving Partial Differential Equation Using Excel 2000.
- [14] Besser, R. S., Spreadsheet Solution to Two-Dimensional Heat Transfer Problem, Chemical Engineering and Institute for Micromanufacturing, Louisiana Tech Universty, Ruston LA.
- [15] Adi Kusrianto, 2001, *Mengupas Tuntas Formula dan Fungsi Microsoft Excel*, Elex Media Komputindo, Jakarta.

TEKNOLOGI INFORMASI DAN KOMUNIKASI DALAM PEMBELAJARAN FISIKA: KOMPUTERISASI EKSPERIMEN BUNYI BERBASIS *SOUNDCARD* *LAPTOP*

Ishafit

Intisari - Komputerisasi eksperimen tentang bunyi berbasis *soundcard* laptop telah dilakukan. Topik eksperimen terdiri dari pengukuran kelajuan bunyi di udara dengan metode *time of flight*, visualiasi dan pengukuran frekuensi gejala layangan bunyi, pengukuran spektrum frekuensi warna bunyi (*timbre*), dan pengukuran perubahan frekuensi bunyi pada efek Doppler. Perangkat lunak yang digunakan adalah Audacity dan Overtone. Ditinjau dari proses dan hasil eksperimen didapatkan bahwa proses pengukuran serta visualisai gejala bunyi mudah dilakukan, dan hasil pengukuran memiliki tingkat ketelitian tinggi.

Abstrack - Computerization experiments of sound based on laptop soundcard have been carried out. Topics of the experiment consists of measuring speed of sound in air with time of flight methods, visualization and measurement of ²⁷the frequency of the sound beats phenomenon, measurement of the frequency spectrum of sound color (*timbre*), and measurement of sound frequency changes on the Doppler effect. The software used in this experiment is Audacity and overtones. Viewing ²⁴from the experimental results and processes it can be obtained that the measurement

processes including visual phenomenon of sounds is easy to do, and the measurement results have a high accuracy.

3 A. Pendahuluan

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi telah melahirkan perangkat *mobile* seperti komputer *laptop*, yang bobot dan harganya semakin ringan namun memiliki kemampuan menyimpan dan mengolah data relatif besar. *Laptop* juga dilengkapi perangkat multimedia, seperti *soundcard*. Dengan kemampuan dan kelengkapan yang dimilikinya, laptop memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai alat bantu pendidikan (*educational aid*) dalam proses belajar mengajar, baik di kelas sebagai media penyaji informasi maupun di laboratorium sebagai alat bantu eksperimental.

Di dalam *soundcard* terdapat *microprocessor*, yang sering disebut *Digital Sound Processor* (DSP). DSP memiliki fungsi mencuplik masukan analog dan mengubahnya menjadi data digital, menghasilkan gelombang suara, dan melakukan dekomposisi spektrum cahaya. Oleh karenanya, *soundcard* memiliki fungsi yang menyerupai fungsi dari sebuah *function generator* dan *oscilloscope*, walaupun terbatas rentang daerah frekuensinya. DSP dirancang untuk rentang frekuensi suara, yaitu antara 20 Hz sampai dengan 20.000 Hz. DSP bekerja dengan memanfaatkan transformasi fourier, yang mengubah ungkapan fungsi gelombang dalam domain waktu menjadi ungkapan dalam domain frekuensi ^[1].

Dengan prinsip kerja *soundcard* yang bekerja pada kawasan waktu dan frekuensi, maka *soundcard* dapat dikembangkan sebagai *interface* untuk pengukuran waktu dan frekuensi. Dalam makalah ini dibahas topik eksperimen fisika tentang bunyi yang melibatkan pengukuran waktu dan frekuensi. Eksperimen bunyi yang dilakukan meliputi pengukuran kelajuan bunyi di udara dengan metode *time of flight*, visualisasi dan pengukuran frekuensi gejala layangan (*beat*) bunyi, pengukuran

spektrum frekuensi warna bunyi (*timbre*), dan pengukuran perubahan frekuensi bunyi pada efek Doppler.

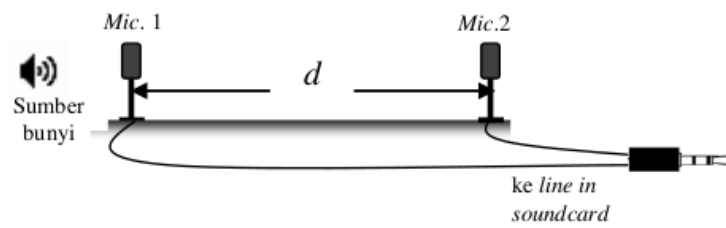
B. Metode Eksperimen

Perangkat yang digunakan dalam eksperimen ini berupa Mini Laptop dengan spesifikasi sebagai berikut: *Processor Intel(R) Atom(TM) CPU N570 1,66 GHz, Memory 1024 MB, Sound Devices* berupa *speakers* dan *microphone (high definition audio device)* dengan *driver HdAudio.sys*, dan sistem operasi Windows 7. Perangkat lunak yang digunakan dalam pengambilan dan analisis data yaitu Tracker 4.62 (sebagai *software video analysis*)^[2], ; Audacity 1.2.6 (sebagai *software video editing/analysis*)^[3], dan Overtone Analyzer Free Edition 1.5.2 (sebagai *software Audio Spectrometer*)^[4].

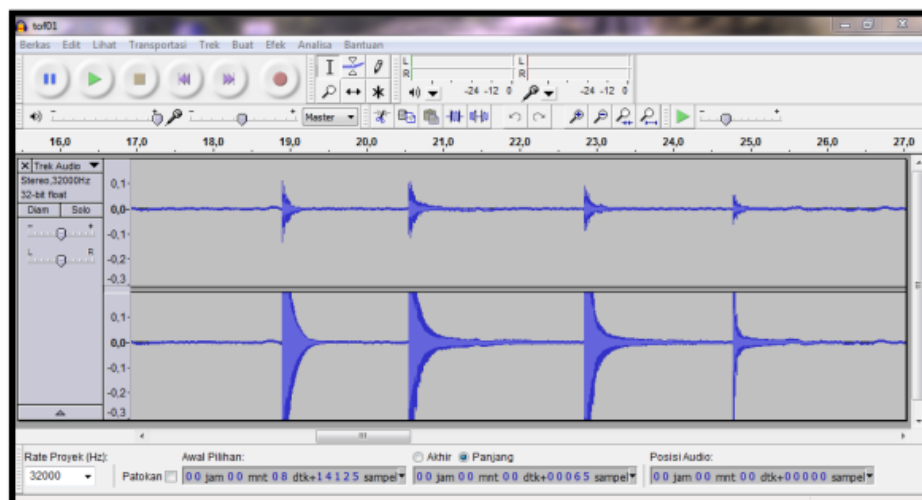
1. Pengukuran Kelajuan Bunyi dengan Metode *Time of Flight* (ToF)

Time of Flight (ToF) pada dasarnya adalah metode pengukuran waktu yang ditempuh oleh objek, partikel, atau gelombang yang bergerak dalam jarak tertentu melalui medium^[5]. Penerapan metode ToF dalam pengukuran kelajuan bunyi dilustrasikan pada gambar 2.1. Sumber bunyi, mikrofon 1 dan mikrofon 2 diletakkan dalam satu garis lurus. Ketika bunyi merambat, kedua mikrofon akan menangkap bunyi pada waktu yang berbeda. Perbedaan waktu (t) tersebut adalah waktu yang diperulan bunyi untuk menempuh jarak sejauh d , sahingga kelajuan bunyi (v) di medium dihitung dengan persamaan^[6] :

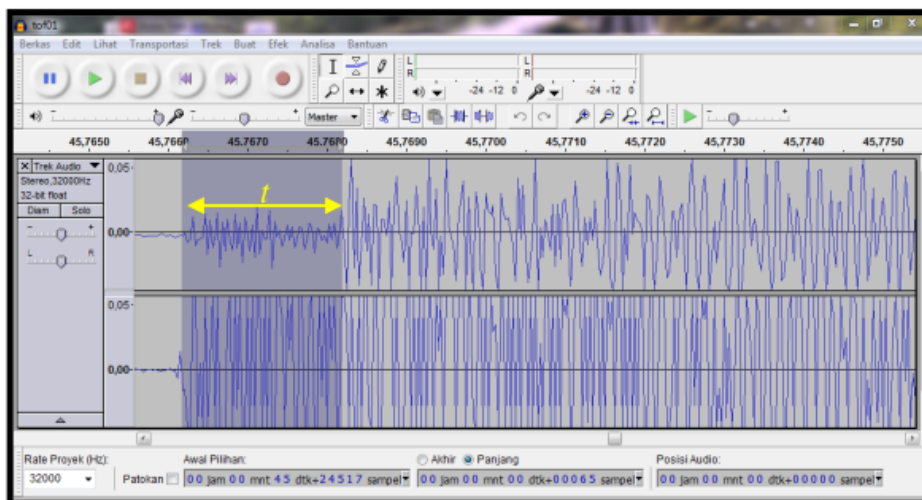
$$v = \frac{d}{t} \quad (2.1)$$



Gambar 2.1. Susunan perangkat eksperimen metode *Time of Flight*



Gambar 2.2. Hasil rekaman bunyi dari kedua mikrofon



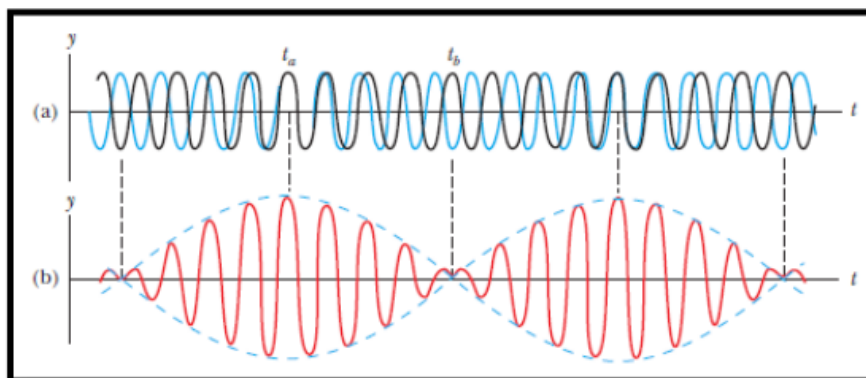
Gambar 2.3. Perbedaan rekaman bunyi dari kedua mikrofon

Hasil pengukuran dengan perangkat lunak Audacity sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.2. Dengan menggunakan sampling rate 32000, beda waktu antara bunyi yang diterima kedua mikrofon yang berjarak $d=70$ cm adalah 65 sample atau $t=0,002031$ s (Gambar 2.3). Dengan demikian, nilai ukur kelajuan bunyi adalah 344,6 m/s.

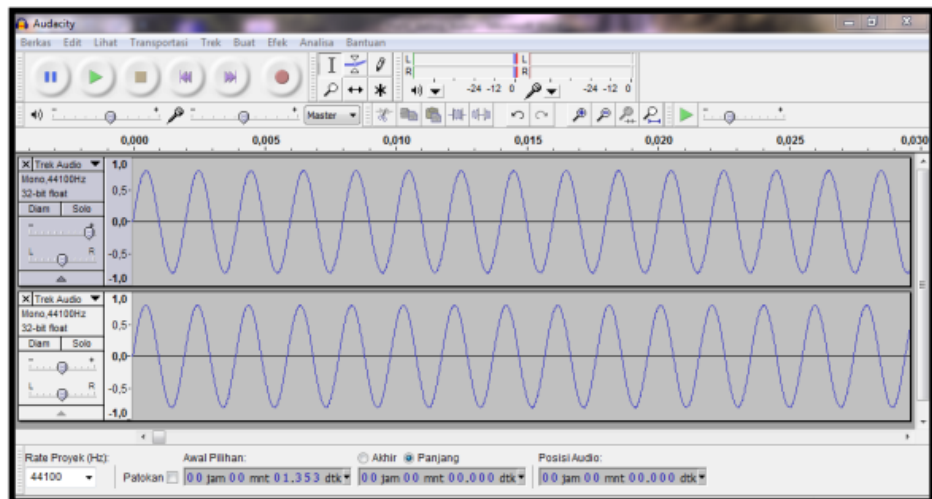
2. Visualiasi dan pengukuran frekuensi gejala layangan (*beat*) bunyi

Gejala layangan (*beat*) adalah gejala interferensi dalam kawasan waktu terjadi jika kedua sumber bunyi memiliki frekuensi hampir sama bergerak dalam arah yang sama. Inteferensi dari keduanya menghasilkan intensitas suara pada posisi tertentu naik dan turun secara bergantian. Perubahan intensitas yang berjarak tertentu dan terdengar teratur ini disebut gejala layangan. Gejala layangan diilustrasikan pada gambar 2.4. Jika bunyi 1 memiliki frekuensi f_1 dan bunyi 2 memiliki frekuensi f_2 maka frekuensi layangan f_b bunyi adalah^[7]:

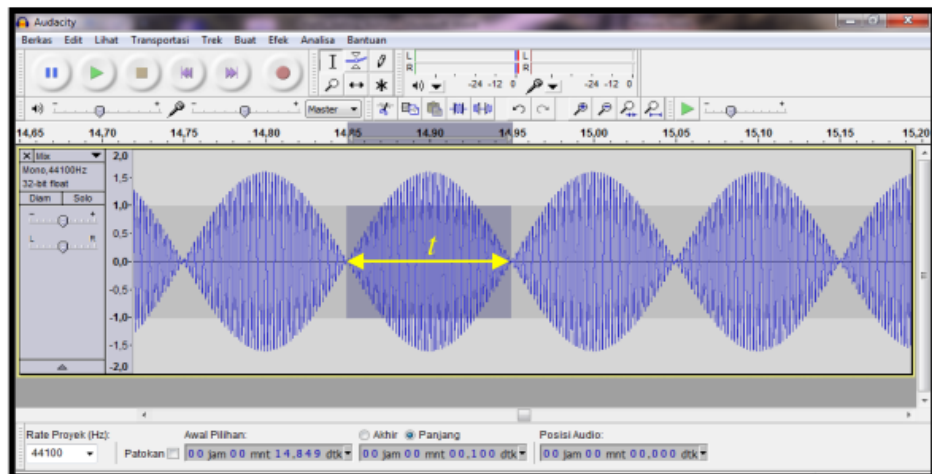
$$f_b = |f_2 - f_1| \quad (2.2)$$



Gambar 2.4. Visualisasi gejala layangan^[8]



Gambar 2.5. Gelombang sinus untuk bunyi 500 Hz dan 510 Hz

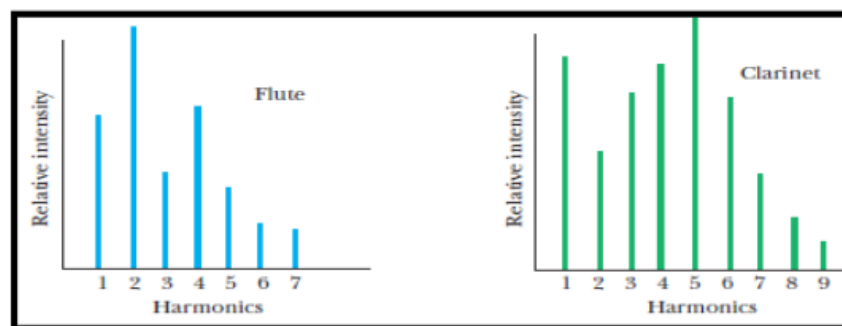


Gambar 2.6. Layangan dari bunyi dengan frekuensi 500 Hz dan 510 Hz

Pada eksperimen ini, sumber bunyi dibangkitkan dari suondcard laptop dengan perangkat lunak Audacity melalui perintah < buat – nada >. Dua bunyi yang dibangkitkan berfrekuensi 500 Hz dan 510 Hz (Gambar 2.5). Gejala layangan dibuat dengan menginterferensikan kedua bunyi tersebut melalui perintah < trek - mix dan render >, setelah sebelumnya kedua bunyi dipilih melalui perintah < edit-pilih >. Dari layangan bunyi (Gambar 2.6) diperoleh frekuensi layangan sebesar 10 Hz.

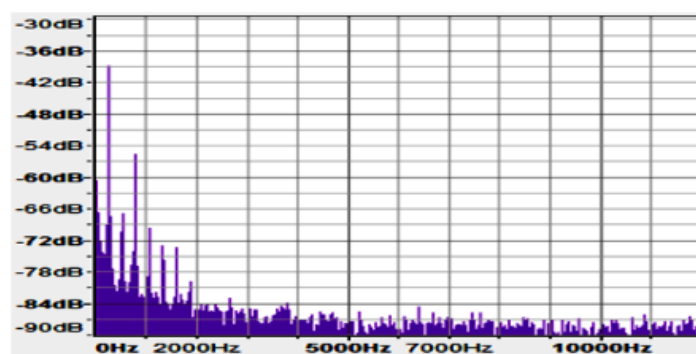
3. Pengukuran spektrum frekuensi warna bunyi (*timbre*)

Karakteristik bunyi yang terdengar dari instrumen musik mengandung tiga aspek yaitu kenyaringan, ketinggian, dan kualitas. Sebagai contoh, piano dan flute yang dimainkan dengan nada yang sama akan menghasilkan bunyi yang berbeda secara keseluruhan. Kualitas bunyi dalam instrumen musik dikenal pula dengan istilah warna bunyi atau *timbre*. Kualitas bunyi tergantung pada adanya nada tambahan. Ketika suatu not dimainkan, nada dasar dan nada tambahan akan ada pada waktu yang sama. Nada dasar memiliki amplitudo yang paling besar^[7].

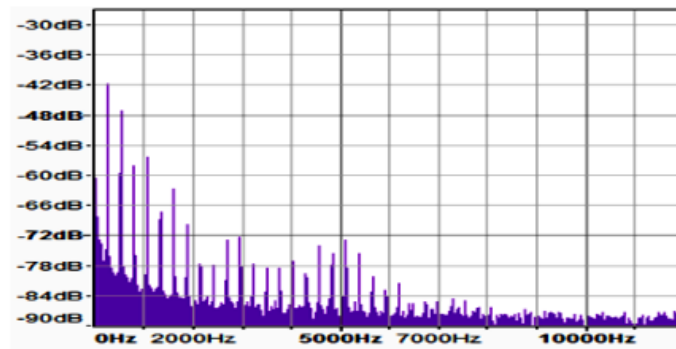


Gambar 2.7. Layangan dari bunyi dengan frekuensi 500 Hz dan 510 Hz

Dalam eksperimen ini digunakan sumber bunyi dari biola, dengan sampel nada dari salah satu senar. Cara membunyikan senar dilakukan dengan dua cara dipetik dan digesek. Hasil perekaman dan analisis bunyi dengan perangkat lunak Audacity dengan perintah *plot spectrum* disajikan pada gambar 2.8 dan gambar 2.9. Kedua cara menghasilkan frekuensi dominan sebesar 255 Hz, namun mengandung komponen frekuensi tambahan yang berbeda.



Gambar 2.8. Warna bunyi dari senar biola yang dipetik

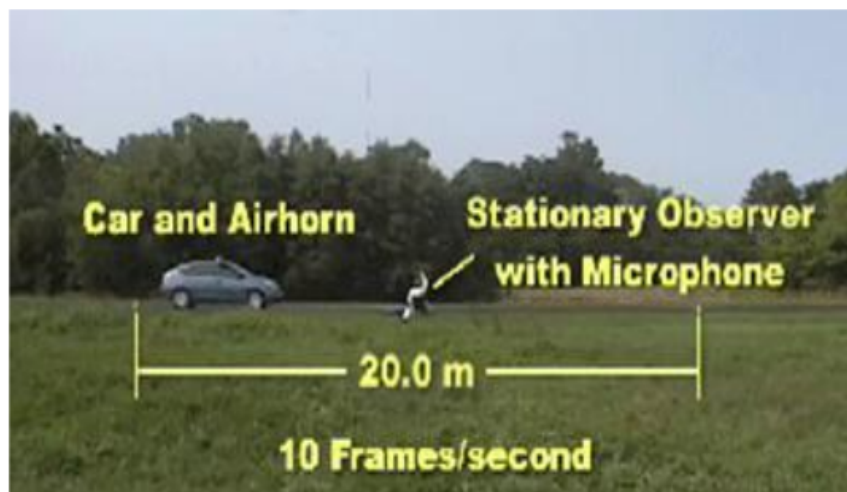


Gambar 2.9. Warna bunyi dari senar biola yang digesek

4. Pengukuran perubahan frekuensi bunyi pada efek Doppler

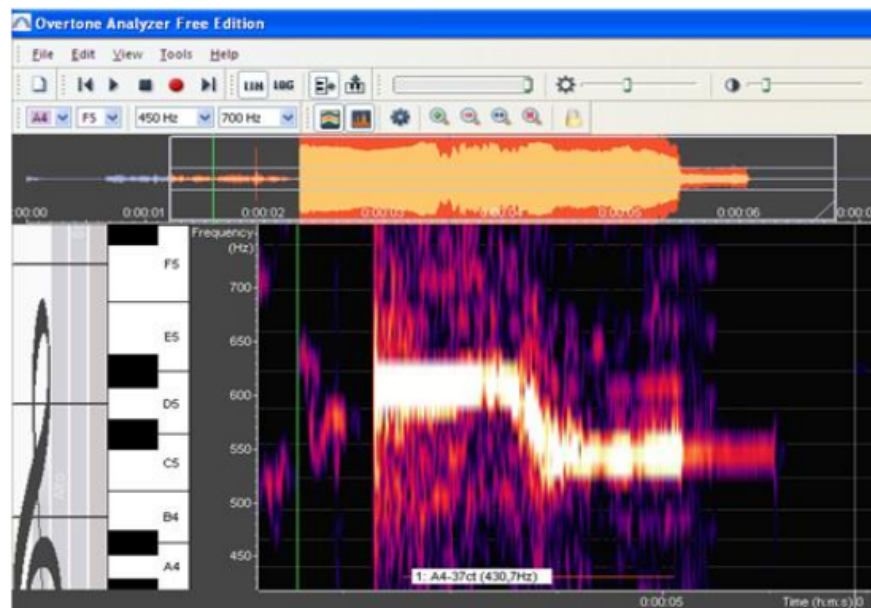
Eksperimen efek Doppler dilakukan untuk kasus sumber dan pendengar terletak pada garis lurus, dengan sumber bergerak menuju pendengar yang diam. Jika bunyi dengan frekuensi f_s dipancarkan dari sumber bunyi yang bergerak lurus dengan kecepatan v_s dan pendengar diam maka dapat ditunjukkan bahwa nilai rasio f_F (frekuensi yang diterima ketika sumber mendekati pendengar) terhadap f_B (frekuensi yang diterima ketika sumber menjauhi pendengar) memenuhi persamaan^[9]:

$$\frac{f_F}{f_B} = \frac{v + v_s}{v - v_s} \quad (2.3)$$



Gambar 2.10. Model eksperimen efek Doppler^[9]

Gejala Doppler yang digunakan adalah rekaman video dari mobil yang membunyikan klakson dan bergerak lurus mendekati dan menjauhi pendengar diam [file Doppler.mov]^[9]. Pengukuran frekuensi dilakukan dengan perangkat lunak Overtone, yang menyajikan *spectrogram* frekuensi sebagaimana gambar 2.10. Dari *spectrogram* tersebut diperoleh nilai ukur $f_F=602,93$ Hz dan $f_B=538,33$ Hz. Sehingga diperoleh nilai eksperimental $f_F/f_B=1,120$.



Gambar 2.11. Spektrogram gejala Doppler dari Overtone

Nilai perhitungan teoritis dengan kecepatan sumber 20,58 m/s (hasil analisis video terhadap gerakan sumber dengan perangkat lunak *Tracker*)^[2] dan kelajuan bunyi 347,56 m/s diperoleh nilai $f_F/f_B=1,126$.

C. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengukuran kelajuan bunyi dengan metode ToF adalah 344,6 m/s, dengan tingkat ketelitian pengukuran waktu mencapai 1,5 %. Visualisasi gejala layangan bunyi dapat ditunjukkan dengan mudah dan hasil pengukuran frekuensinya sesuai dengan nilai teoritisnya. Dua bunyi yang diinterferensikan untuk terjadinya gejala

layangan dapat dibangkitkan langsung melalui soundcard laptop dengan perangkat lunak Audacity. Pengukuran spektrum frekuensi warna bunyi (*timbre*) dapat ditunjukkan secara visual dan numerik. Hal ini dimungkinkan karena adanya fasilitas analisis transformasi Fourier pada perangkat lunak Audacity. Hasil pengukuran perubahan frekuensi bunyi pada gejala efek Doppler menunjukkan tingkat akurasi yang baik, dengan tingkat penyimpangan hanya 0,5 % terhadap nilai perhitungan teoritisnya. Hasil eksperimen efek Doppler ini dapat dikembangkan sebagai eksperimen verifikasi pada pembelajaran topik bunyi.

D. Kesimpulan

Kesimpulan dari komputerisasi eksperimen bunyi berbasis *soundcard laptop* dengan perangkat lunak *audio editing* adalah: (1) proses eksperimen bunyi yang meliputi pengukuran, visualisasi gejala, dan analisis mudah dilakukan dengan hanya berbekal kemampuan dasar mengoperasikan komputer, (2) hasil pengukuran memiliki tingkat akurasi dan presisi tinggi. Untuk keperluan pembelajaran fisika, topik eksperimen bunyi yang telah dilakukan layak dijadikan sebagai bahan ajar.

E. Pustaka

- [1] R. Hidayat, Eksperimen Gelombang dengan Bantuan PC/Laptop Sound Card, Pelatihan Perancangan Alat Percobaan Fisika, LFD-ITB dan HFI, Bandung (2010), p. 2-3.
- [2] Brown, D, Tracker 1.7.2., The Open Source Physics Project, NC (2007), tersedia di <http://www.opensourcephysics.org/index.cfm>
- [3] Audacity 1.2.6. a Free Digital Audio Editor Software, tersedia di: <http://audacity.sourceforge.net/>
- [4] Overtone Analyzer Free Edition Version 1.5.2.2900, Sygyt Software (2010), tersedia di: www.sygyt.com
- [5] Wikipedia, The Free Encyclopedia, tersedia di http://en.wikipedia.org/wiki/Time_of_flight
- [6] Lopes dos Santos, JMB. and Maques, MB, A Time of Flight Methods to Measure the Speed of Sound Using a Stereo Sound Card, The Physics Teacher vol. 46 (2008), p. 428-431.
- [7] Giancoli, DC., Fisika, Jakarta, Erlangga (1998), p. 425-427.

- [8] Serway, RA. dan Jewett, Jr. JW, Fisika untuk Sains dan Teknik, Jakarta, Salemba Teknik (2009), p. 859.
- [9] The LivePhoto Physics Project, Rochester Institute of Technology, 2008, tersedia di <http://livephoto.rit.edu/>

INOVASI PEMBELAJARAN FISIKA DENGAN *VIDEO BASED LABORATORY* (VBL): STUDI KASUS PEMBELAJARAN GERAK HARMONIK SEDERHANA

Ishafit

Intisari - Hasil riset pendidikan fisika menunjukkan bahwa pembelajaran fisika akan bermakna apabila pembelajaran diawali oleh hal yang nyata kemudian menuju ke abstrak, yaitu menghubungkannya dengan dunia nyata serta penjelasan konsepnya, dan baru kemudian memberikan nama atau definisi. Implementasi pembelajaran fisika yang demikian dapat dilakukan dengan menggunakan media analisis video, yang dikenal dengan istilah *Video Based Laboratory* (VBL), terhadap gejala fisika nyata. Makalah ini menyajikan contoh inovasi pembelajaran untuk topik materi ajar osilasi, yaitu gerak harmonik sederhana dengan menggunakan VBL. Langkah pembelajaran diawali dengan penyajian rekaman video gerak harmonik sederhana, penjelasan konsep tentang kinematika dan dinamika gerak harmonik sederhana, kemudian dilakukan analisis video untuk mendapatkan data serta grafik simpangan sebagai fungsi waktu dan dilanjutkan dengan penurunan persamaan gerak harmonik sederhana. Pembelajaran fisika dengan VBL akan dapat membantu peserta didik membuat hubungan antara bagian-bagian penting dalam dunia nyata (*real world*) dengan representasi abstrak dari fisika.

Abstrack – As the result of physics education study shows that physics learning become meaningful when proceeded by the real thing then headed to the abstract, relate to the real world as well as the explanation of the concept, then provide the definition. This kind of learning can be done by using video analysis media, also known as Video Based Laboratory (VBL), to the real physics phenomenon. This paper presents an example of learning innovation of oscillation teaching materials, i.e. simple harmonic motion by using VBL. Learning step begins with the presentation of simple harmonic motion video, explanation of kinematics and simple harmonic motion dynamic concepts, and then the video analyzed to get the data as well as deviation chart as time function and continued by differentiate the equation of simple harmonic motion. Physics learning using VBL will guide students to determine the correlation of real world and the abstract representation of the physics.

A. Pendahuluan

Beberapa prinsip pembelajaran telah dikembangkan sebagai hasil riset dalam pendidikan fisika, yaitu pembelajaran fisika: dimulai dari yang konkrit ke abstrak yang membuat hubungan dengan dunia nyata serta mendahulukan konsep baru kemudian ke pemberian nama atau definisi, membuat peserta didik memberikan artikulasi terhadap objek (apa yang dilihat, dikerjakan, dan paham dalam pendefinisian), memberikan kegiatan konstruktif yang lebih efektif dari kegiatan pembelajaran yang hanya menerima materi yang disajikan, dan memberikan pengalaman langsung yaitu membuat prediksi dan mampu melihat perbedaan antara yang diprediksi dengan yang diamati^[1].

Sejalan dengan perkembangan prinsip pembelajaran, teknologi media pembelajaran yang berbasis pada teknologi informasi (komputer) juga semakin berkembang dan beragam. Penggunaan komputer untuk peningkatan proses dan hasil pembelajaran, dalam bidang sains (fisika) telah melahirkan beberapa kategori diantaranya ialah *Microcomputer Based Laboratory (MBL)*, *Video Based Laboratory*

(VBL), dan *Simulation Based Laboratory (SBL)*. Dalam *MBL*, penggunaan komputer difokuskan pada proses pencatatan data eksperimental fisika secara otomatis dengan menggunakan berbagai jenis sensor, sehingga dapat melakukan berbagai pengukuran secara lengkap dan otomatis serta *real time*. Penggunaan komputer dalam sistem *VBL* difokuskan pada analisis fenomena/gejala fisika yang teramati pada rekaman video digital menggunakan *software* analisis video. Sedangkan pada kategori *SBL*, komputer diterapkan pada pembuatan gejala fisika melalui simulasi yang bertumpu pada model matematis. Kekuatan utama dalam *SBL* adalah kemampuannya untuk memvariasi parameter-parameter eksperimen untuk memunculkan respons yang berbeda dari besaran-besaran fisika yang diamati.

Didukung oleh perkembangan teknologi kamera *video* digital, *VBL* semakin potensial digunakan untuk peningkatan proses belajar mengajar di bidang sains. Gamboa, et al.^[2] mengemukakan bahwa *VBL* merupakan alat pendidikan yang dapat memadukan aspek teoritis dan eksperimental dalam pengajaran fisika. *Video* digital interaktif dalam *VBL* memberikan kesempatan pada siswa untuk terlibat secara aktif dalam pembelajaran sains^[3]. Beichner dan Abbot^[4] berpendapat bahwa dengan melihat keduanya yaitu kejadian gerak sebenarnya dengan penyajian grafik secara abstrak dalam *VBL* maka siswa akan lebih mudah membuat hubungan kognitif bila dihadapkan pada munculnya miskonsepsi terhadap gerak. Melalui *software* yang dikembangkan untuk *VBL* untuk mengolah *video* digital secara interaktif, memungkinkan siswa menangani kejadian gerak dalam *video* dan dapat menganalisis gerakan dengan cermat melalui grafik yang dibuat oleh mikrokomputer^[3].

Ide menggunakan video untuk menganalisis gerak pertama kali dikembangkan oleh D. A. Zollman dan R. G. Fuller di tahun 1994^[5], yaitu dengan menggunakan gambar *videodisc* yang ditayangkan di layar televisi. Peserta didik diminta memasang lembar plastik transparan pada layar dan memberi tanda di posisi objek ketika bergerak dari *frame* ke *frame*. Tanda-tanda ini kemudian digunakan untuk membuat grafik gerakan objek^[5]. Sedangkan penggunaan komputer dalam kegiatan

laboratorium fisika telah dimulai dipertengahan tahun 1980-an oleh Beichner. Ketersediaan teknologi yang relatif primitif saat itu hanya menghasilkan gambar hitam putih. Objek bergerak dari digitalisasi *video* sulit diorganisir, karena minimnya warna atau bayangan abu-abu yang datar^[4].

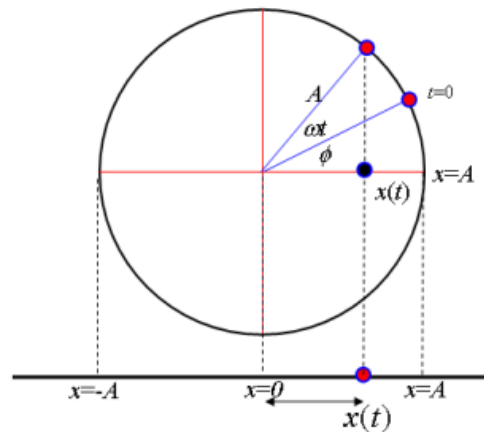
Saat ini telah tersedia beberapa perangkat lunak untuk *VBL*, seperti *VideoPoint* dari *Lenox Softwork* yang dikembangkan untuk *Workshop Physics Project*. *Vernier Software & Technology* mengembangkan *Logger Pro* sebagai perangkat lunak untuk mengambil dan menganalisis data dari *Vernier Lab Pro 3*, yang memiliki fasilitas *Video Analysis* untuk membuat dan menganalisis grafik representasi gerak yang terlihat dalam *video*. Kontrol panel utama dari perangkat lunak secara otomatis atau manual dengan mudah dioperasikan dalam menjalankan rekaman *video* dari *frame* ke *frame* sehingga perubahan gejala sebagai fungsi waktu dapat teramati^[6].

Bertolak dari perkembangan prinsip-prinsip pembelajaran fisika yang berbasis pada hasil riset dan perkembangan teknologi media pembelajaran yang memanfaatkan kamera video dalam sistem *VBL*, serta terdorong oleh niatan untuk melakukan inovasi dalam pembelajaran fisika yang lebih menekankan pada dunia nyata dalam fisika, penulis mencoba memberikan alternatif proses pembelajaran fisika dengan *VBL*. Sebagai contoh diambil materi fisika gerak harmonik sederhana (GHS), yang mana penyampaian materi ajar dimulai dari yang konkrit, yaitu dengan menyajikan rekaman video gerak harmonik sederhana, kemudian dilanjutkan ke abstraksi, yaitu penggalan konsep, besaran, dan penurunan persamaan yang berlaku dalam gerak harmonik sederhana.

B. Gerak Harmonik Sederhana (GHS)

Kajian teoritik gerak harmonik sederhana meliputi aspek kinematika, dinamika, dan energetika. Pembahasan tentang kinematika diawali dengan menurunkan

persamaan simpangan sebagai fungsi waktu $x(t)$. Model yang digunakan untuk penurunan persamaan simpangan dan konsep gerak harmonik sederhana adalah gerak proyeksi partikel yang bergerak melingkar beraturan pada diameter lingkaran (gambar 3.1).



Gambar 3.1. Proyeksi gerak partikel pada sumbu-x

1. Kinematika Gerak Harmonik Sederhana

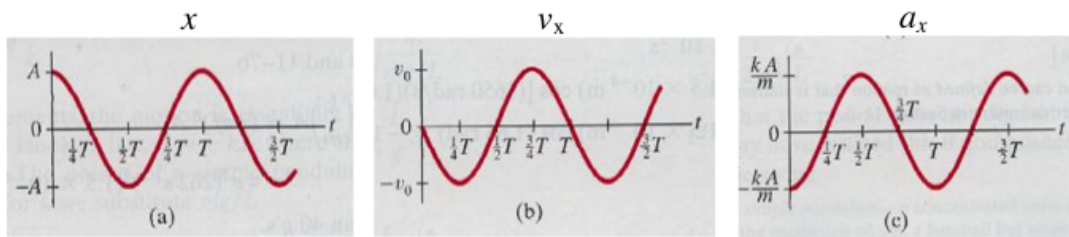
Proyeksi gerak partikel yang bergerak melingkar beraturan ke sumbu horizontal atau sumbu vertikal merupakan gerak harmonik sederhana (*simple harmonic motion*), dengan persamaan simpangan:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi) \quad (3.1)$$

dalam hal ini: A = *amplitude* ; ϕ = sudut *phase*, $x(t)$ = simpangan partikel terhadap titik $x=0$ (titik kesetimbangan). Dari persamaan simpangan ini, besaran kecepatan $v_x(t)$ dan percepatan $a_x(t)$ dapat diturunkan^[7],

$$v_x(t) = \frac{dx}{dt} = -A\omega \sin(\omega t + \phi) \quad (3.2)$$

$$a_x(t) = \frac{dv_x}{dt} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \phi) = -\omega^2 x \quad (3.3)$$



Gambar 3.2. Grafik (a) simpangan (x), (b) kecepatan (v), dan (c) percepatan, a dari GHS^[8]

2. Kinematika Gerak Harmonik Sederhana

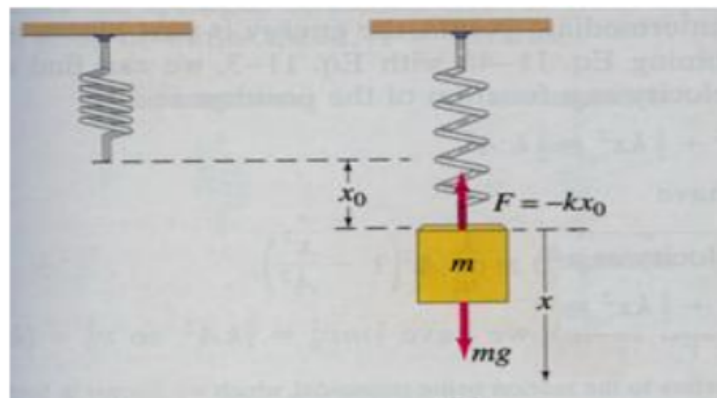
Tinjauan dinamika gerak harmonik sederhana dari sistem osilasi massa-pegas diilustrasikan melalui gambar 3.3. Berdasarkan Hukum II Newton diperoleh persamaan:

$$\sum F_x = ma_x = -m\omega^2 x \quad (3.4)$$

$$-kx = -m\omega^2 x \quad (3.5)$$

dengan frekuensi sudut (ω), frekuensi (f), dan periode (T) adalah:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \text{dan} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3.6)$$



Gambar 3.3. Sistem osilasi massa-pegas^[8]

3. Energitika Gerak Harmonik Sederhana

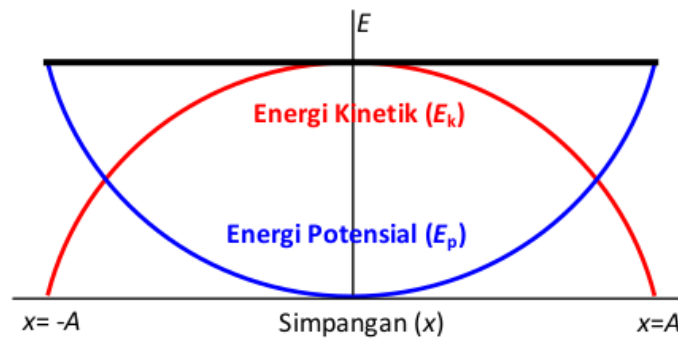
Jika tidak ada gaya disipatif, maka energi mekanik (jumlah energi kinetik dan energi potensial) sistem akan konstan:

$$E = E_k + E_p = \text{konstan} \text{ atau } \frac{1}{2}mv_x^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \text{konstan} \quad (3.7)$$

Pada simpangan maksimum ($x=A$), energi mekanik total sistem osilasi sama dengan:

$$E = \frac{1}{2}kA^2 \quad (3.8)$$

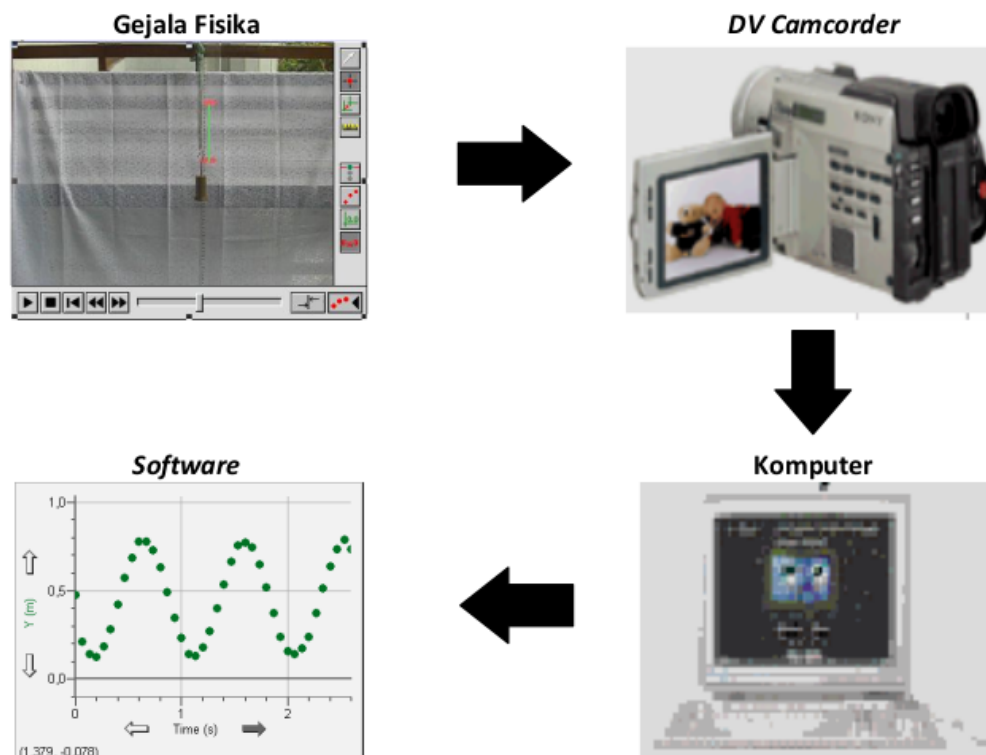
$$\frac{1}{2}mv_x^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kA^2$$



Gambar 3.4. Grafik energi gerak harmonik sederhana

C. *Video Based Laboratory* (VBL)

Perangkat VBL terdiri dari perangkat lunak *video analysis* dan perangkat keras. Salah satu perangkat lunak untuk sistem VBL adalah Logger Pro 3. Perangkat lunak ini memerlukan perangkat keras berupa komputer dengan prosesor minimal Pentium 3 atau kompatibelnya dengan sistem operasi windows 98 atau versi terbarunya. Perangkat keras lain yang dibutuhkan adalah *camcorder* atau *digital camera* yang memiliki fasilitas perekaman *video*.



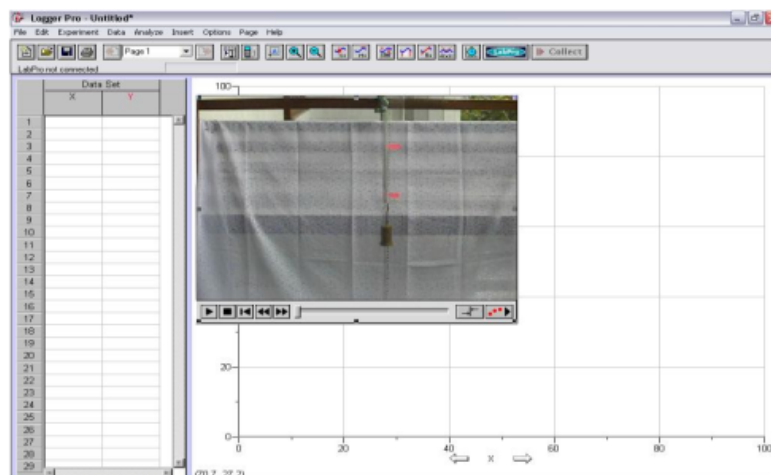
Gambar 3.5. Perangkat *Video Based Laboratory*

Secara garis besar, prosedur kerja analisis dengan *VBL* adalah sebagai berikut:

(1) Penyiapan dan pembuatan rekaman *video* gejala fisika, (2) Menjalankan rekaman video pada sistem *VBL*, (3) Menentukan posisi atau titik koordinat dari objek yang diamati dari *frame* ke *frame* sebagai fungsi waktu dalam kerangka acuan layar aktif video, (4) Menyajikan nilai koordinat dan waktu dalam bentuk tabel data atau grafik posisi terhadap waktu. Proses analisis *video* dengan menggunakan Logger Pro 3 adalah sebagai berikut:

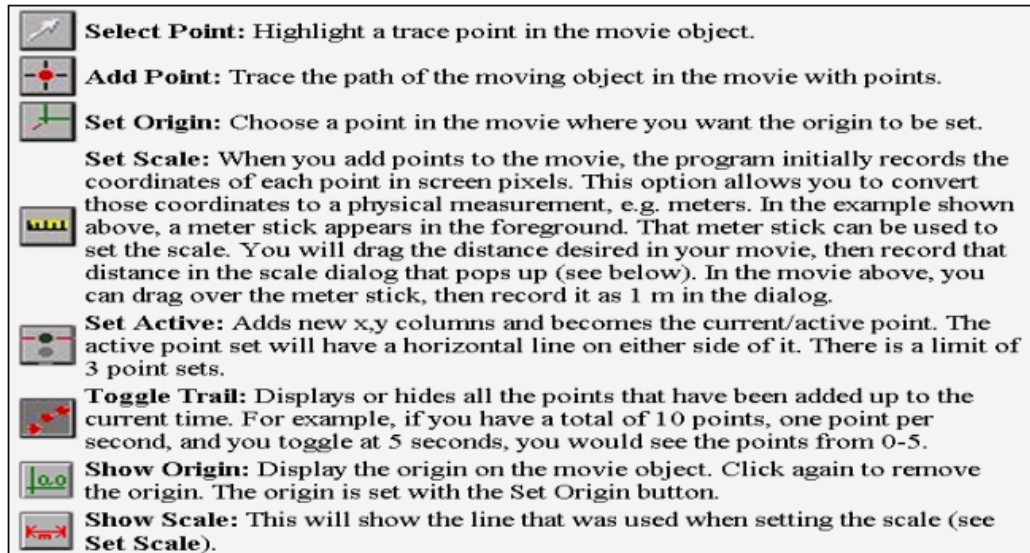
- 1) Mengaktifkan perangkat lunak Logger Pro 3
- 2) Mengaktifkan rekaman *video* gejala fisika ke layar aktif Logger Pro 3, melalui *Insert menu*, dan *Additional Object Movie*, sehingga muncul tampilan *movie player*.

Jika video GHS diaktifkan, maka langkah 1 dan 2 menghasilkan tampilan di monitor seperti terlihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Tampilan video di layar aktif Logger Pro 3

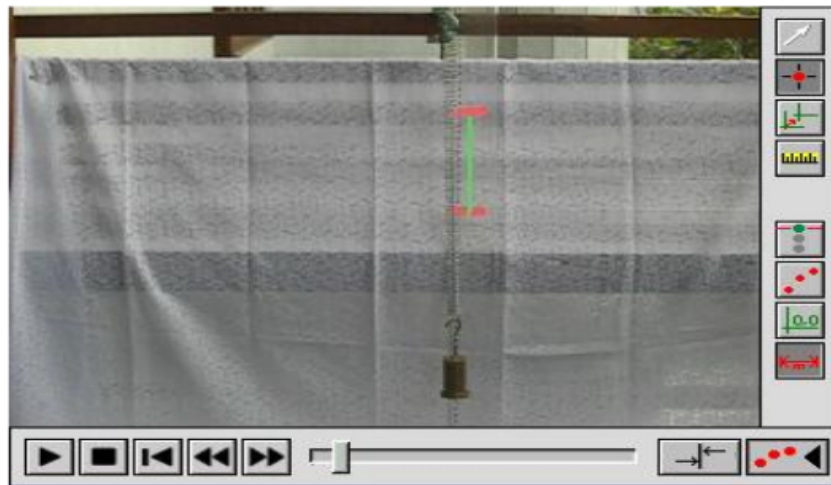
- 3) Menjalankan *video* dan melakukan *tracking* lintasan objek dengan menggunakan *Video Analysis Tools Buttons* (Gambar 3.7) untuk mendapatkan data numerik dari posisi objek sebagai fungsi waktu.
- 4) Membuat dan menganalisis grafik kinematika dengan menggunakan Grafik *Analysis Tools Buttons* dari Logger Pro 3.



Gambar 3.7. Video Analysis Tools Buttons dari Logger Pro 3

D. Pembelajaran GHS dengan *Video Based Laboratory*

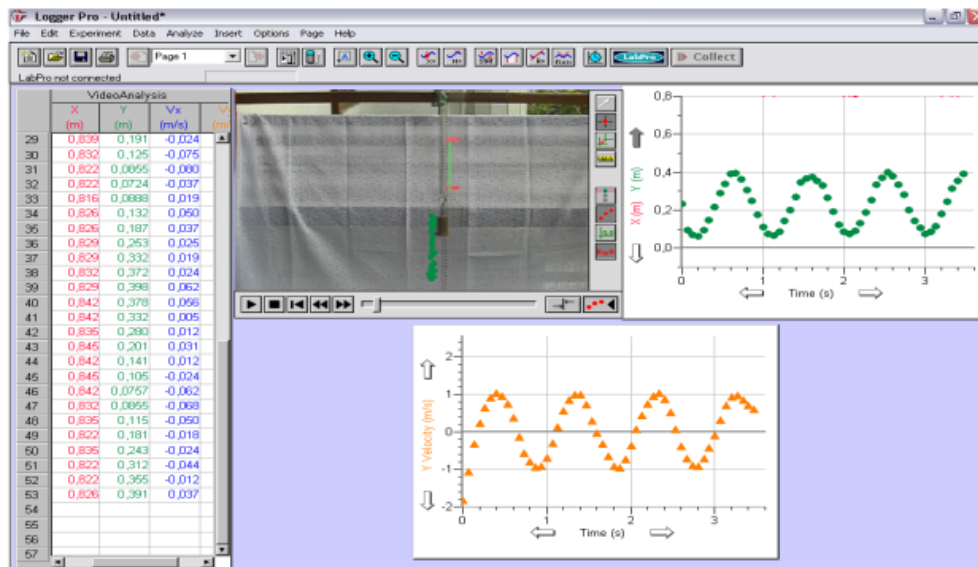
Pembelajaran GHS berbasis VBL dapat diawali dengan menyajikan contoh rekaman *video* GHS yang sebelumnya telah disiapkan dengan *DV Camcorder* atau kamera digital yang memiliki *mode movie*. Penyajian rekaman GHS dapat menggunakan *software video player* seperti QuickTime, Window Media Player, atau langsung menggunakan Logger Pro. Contoh penyajian rekaman video untuk GHS seperti pada gambar 3.8.



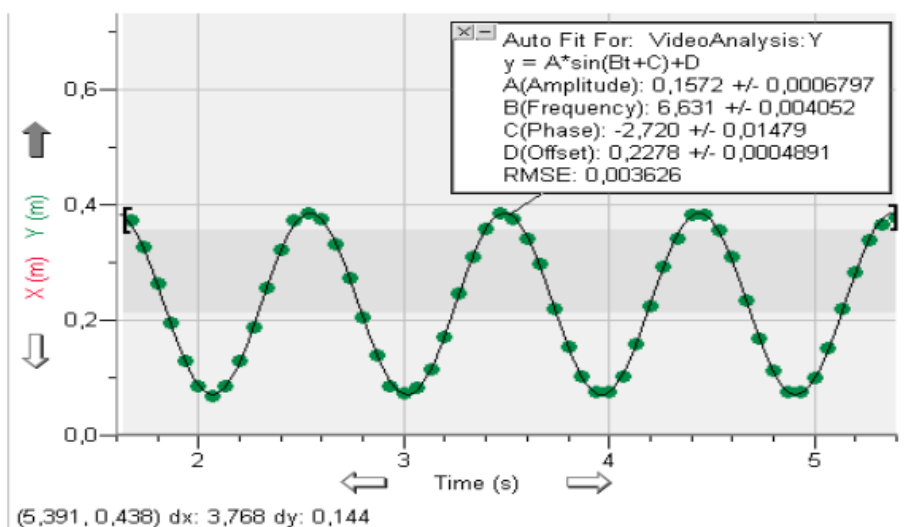
Gambar 3.8. Contoh tampilan rekaman video GHS dari sistem massa-pegas

Setelah selesai penyajian rekaman video GHS, peserta didik diajak berdiskusi untuk penggalan konsep atau melakukan kajian teoritik tentang GHS dari aspek kinematika, dinamika, dan energetika, sebagaimana kajian teoritik GHS pada bagian II di atas. Untuk hal ini, peserta didik lebih dahulu diberi tugas kajian literatur tentang materi terkait sebelum mengikuti pembelajaran. Agar peserta didik dapat menghubungkan aspek teoritik dengan aspek nyata dari data pengamatan/eksperimental atau komparasi keduanya, maka pembelajaran dilanjutkan dengan melakukan analisis *video* dengan Logger Pro terhadap rekaman gejala GHS. Tabel data dan grafik sebagai representasi kongkrit dari gejala GHS hasil analisis video ditunjukkan pada gambar 3.9. Dengan melakukan pencocokan data melalui fasilitas

yang telah tersedia dalam Logger Pro 3, persamaan kinematika GHS secara empiris dapat diturunkan (gambar 3.10).



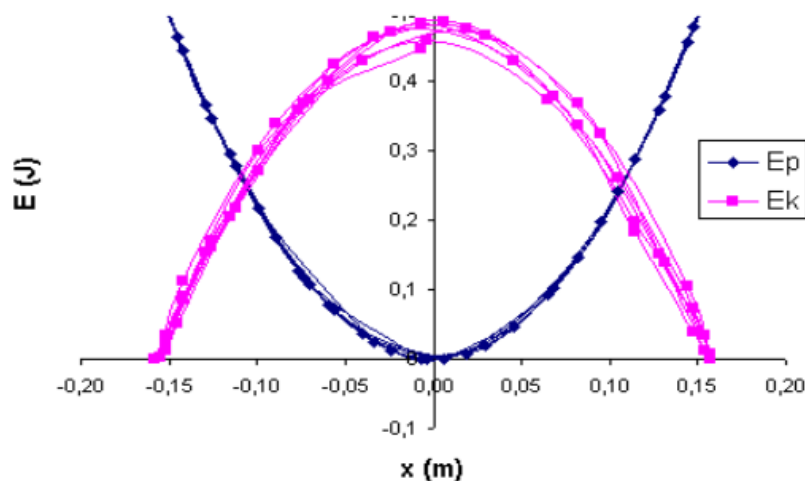
Gambar 3.9. Tampilan Hasil Analisis Video GHS di Layar Aktif Logger Pro 3



Gambar 3.10. Hasil pencocokan data ke fungsi sinus dari grafik y-t

Grafik energi GHS dapat diperoleh dengan mengeksport data di tabel hasil analisis ke paket program pengolah angka (seperti Microsoft Excel) dan melakukan

perhitungan terhadap energi kinetik serta energi potensial GHS. Dari hasil perhitungan ini dapat dibuat grafik energi GHS (Gambar 3.11).



Gambar 3.11. Grafik Energi GHS

Data, persamaan, dan grafik yang terkait dengan gejala GHS dapat dengan mudah diperoleh melalui *VBL*, sehingga peserta didik dengan mudah pula melakukan komparasi terhadap hasil kajian teoritik dengan hasil pengamatan/eksperimental.

E. Kesimpulan

VBL mampu menyajikan gejala fisika nyata dan berbagai bentuk representasinya (data kuantitatif, grafik, dan persamaan) secara simultan, yang dapat dilakukan secara interaktif. *VBL* merupakan alat yang mampu memadukan aspek teoritik dan eksperimental dalam pembelajaran fisika. Dengan demikian, peserta didik dapat memperoleh dan mengkonstruksi pengetahuannya melalui keterpaduan kegiatan kajian teoritik dan eksperimental.

F. Pustaka

- [1] Redish, E. F., 1993, What Can a Physics Teacher Do with a Computer?, <http://www.physics.umd.edu/groups/ripe/efr/resnick1.html>
- [2] Gamboa, F., et al., 1999, Specification and Development of A Physics Video Based Laboratory, Instrumentation and Development Vol. 4 Nr. 5.
- [3] Escalada, L. T., et al., 1996, Application of Interactive Digital Video in a Physics Classroom, Journal of Educational Multimedia and Hypermedia, 5(1), 73-97. <http://www.phys.ksu.edu/perg/papers/applicat.html>
- [4] Beichner, R. J., and Abbott, D. S., 1999, Video-Based Labs for Introductory Physics Courses, JCST November 99. http://www.ncsu.edu/per/articles/jcst9911_101.pdf
- [5] Zollman, D. A. and Fuller, R. G., 1994, Teaching and Learning Physics with Interactive Video, Physics Today, 47(4), 41-47. <http://www.phys.ksu.edu/perg/dvi/pt/intvideo.html>
- [6] Vernier International, 2004, Data Collection with Computer and Handhelds 2004 Catalog. <http://www.vernier-intl.com>
- [7] Stanford, A. L. and Tanner, J. M., 1985, Physics for Students of Science and Engineering, Academics Press, Inc. Orlando.
- [8] Giancoli, D. C., 1998, PHYSICS: Principles with Applications, Printice-Hall.

VIDEO BASED LABORATORY SEBAGAI MEDIA PENGEMBANGAN KETERAMPILAN INTERPRETASI GRAFIK KINEMATIKA

Ishafit

Intisari - Grafik kinematika merupakan objek studi dan bahasa pembelajaran dalam fisika. Interpretasi terhadap kumpulan data yang disajikan dalam grafik penting untuk membentuk pemahaman terhadap bidang kajian kinematika. *Video Based Laboratory* (VBL), sebagai alat bantu potensial dalam pengembangan kemampuan interpretasi grafik kinematika bagi peserta didik, dibahas dalam makalah ini. VBL telah digunakan untuk menampilkan dan menganalisis grafik kinematika dari gerak proyektil dan gerak harmonik sederhana. VBL berkemampuan baik untuk digunakan sebagai media pengajaran kinematika yang mencakup aspek teoritis maupun eksperimental.

Abstrack – Kinematics graphs are used as objects study and a language of learning in physics instruction. Interpreting the large amount of data displayed on the graphs is critical to making sense of the kinematics field. In this paper, Video Based Laboratory (VBL), as a powerful tools for improving student in interpreting kinematics graph, is presented. VBL have been used to generating and analysis kinematics graph of projectile motion and simple harmonic motion. VBL can used a pedagogical tool that encloses both, the theoretical and experimental aspects in kinematics course.

A. Pendahuluan

Kinematika, kajian fisika tentang gerak, penting untuk memahami fisika. Untuk alasan inilah, kinematika dijadikan topik pertama di dalam pengajaran fisika pendahuluan dan dianggap sebagai dasar untuk mengkaji topik fisika selanjutnya. Dalam kajian kinematika, grafik merupakan unsur penting. Interpretasi sejumlah besar data yang tersaji dalam grafik memudahkan untuk memahami arti bidang kajian. Oleh karena itu, aspek-sapek dari grafik kinematika seperti kemiringan (*slope*) dan luasan berhubungan langsung dengan kuantitas fisika yang teramati, yaitu kelajuan atau percepatan dan jarak yang ditempuh objek. Grafik kinematika digunakan pula sebagai pokok kajian dan bahasa pembelajaran dalam fisika^[1].

Dibalik pengakuan akan pentingnya pemahaman terhadap grafik kinematika ternyata beberapa studi menunjukkan bahwa peserta didik tidak mudah untuk memahami grafik dengan segala aspek atau makna yang terkandung didalamnya. Masalah yang sering dihadapi ketika bekerja dengan grafik kinematika ialah grafik dianggap sebagai layaknya gambar hasil fotografi atau replikasi dari kajadian gerak objek. Kesalahan yang menganggap grafik sebagai gambar ditemukan ketika peserta didik diminta membuat grafik kecepatan atau pecepatan terhadap waktu untuk objek yang bergerak turun dalam bidang miring. Beberapa peserta didik mengalami kesulitan dalam menentukan *slope*. Permintaan untuk menunjuk pada titik dengan *slope* maksimum pada grafik, peserta didik sering menunjuk pada posisi dengan titik ordinat bernilai terbesar^[1].

Beberapa alat bantu (*tools*) pengajaran grafik telah tersedia guna membantu peserta didik memahami grafik kinematika. Dengan bertambah majunya teknologi yang diterapkan di sekolah, beberapa paket instruksional berbasis teknologi informasi atau komputer telah dikembangkan. Salah satunya yang terkenal adalah paket perangkat lunak (*software*) *Graph and Track*, yaitu *software* pembelajaran grafik yang mampu membuat siswa bekerja timbal balik antara mengamati simulasi gerak bola dalam berbagai bentuk lintasan dan grafik kinematika sebagai

representasi gerak bola tersebut^[2]. Alat bantu lain dalam kegiatan eksperimen telah pula dikembangkan dengan berbasis pada detektor gerak (*motion detector*) ultrasonik, *interface* yang dilengkapi *software* pengendali serta analisis grafik, yang dikenal dengan istilah *Microcomputer Based Laboratory (MBL)*. Pendekatan ini difokuskan pada proses pencatatan, penyajian dan analisis data eksperimental dari gejala fisika secara otomatis dan *real time*. Dengan demikian peserta didik akan lebih terfokus pada pengembangan pengertian intuitif dari pengamatan dan eksperimen nyata tentang topik kinematika^[3].

Kemajuan teknologi komputer saat ini telah memunculkan alternatif teknik analisis melalui rekaman *video*, yang dikenal dengan istilah *Video Based Laboratory (VBL)*. Analisis melalui *video* dimungkinkan oleh karena teknologi komputer mampu menangkap dan menjalankan kembali gambar bergerak resolusi tinggi dengan cukup mudah. Peserta didik dapat mengkonsentrasikan pada gambaran gejala fisika dalam *video* dan bukan pada teknik pengumpulan data. Melalui *software* yang dikembangkan untuk *VBL* untuk yang mengolah *video* digital secara interaktif, memungkinkan siswa menangani kejadian gerak dalam *video* dan dapat menganalisis gerakan dengan cermat melalui grafik yang dibuat oleh mikrokomputer^[4].

Ide menggunakan *video* untuk menganalisis gerak pertama kali dikembangkan oleh D. A. Zollman dan R. G. Fuller di tahun 1994, yaitu dengan menggunakan gambar *videodisc* yang ditayangkan di layar televisi. Peserta didik diminta memasang lembar plastik transparan pada layar dan memberi tanda di posisi objek ketika bergerak dari *frame* ke *frame*. Tanda-tanda ini kemudian digunakan untuk membuat grafik gerakan objek^[5]. Sedangkan penggunaan komputer dalam kegiatan laboratorium fisika telah dimulai dipertengahan tahun 1980-an oleh Beichner. Ketersediaan teknologi yang relatif primitif saat itu hanya menghasilkan gambar hitam putih. Objek bergerak dari digitalisasi *video* sulit diorganisir, karena minimnya warna atau bayangan abu-abu yang datar^[1].

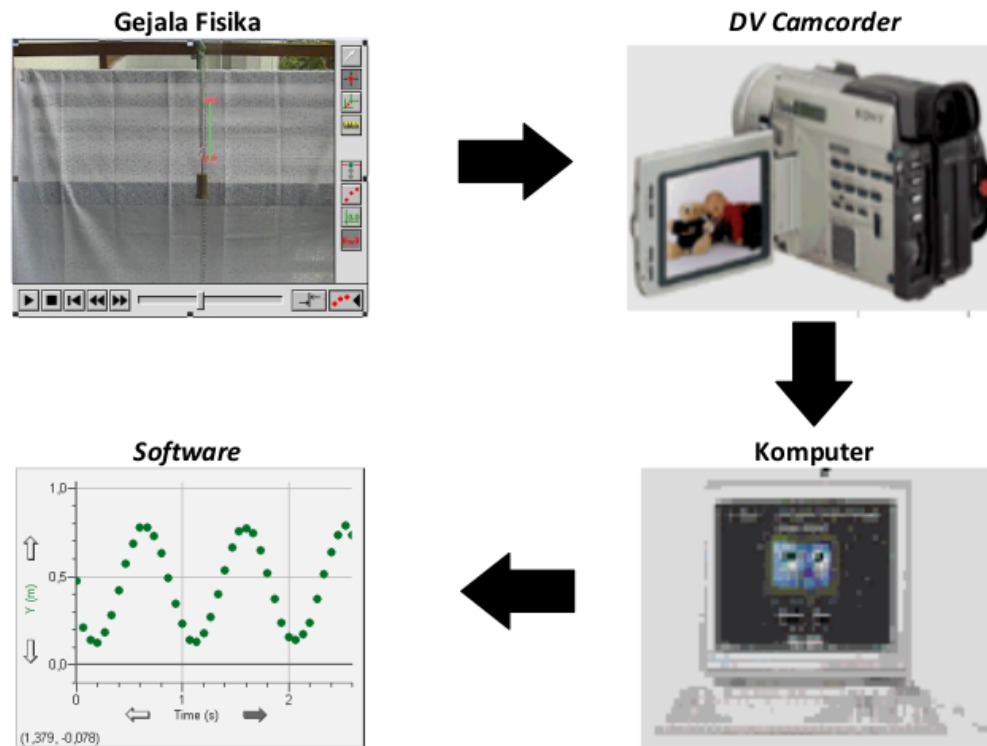
Saat ini telah tersedia beberapa perangkat lunak untuk *VBL*, seperti *VideoPoint* dari *Lenox Softwork* yang dikembangkan untuk *Workshop Physics Project*. *Vernier Software & Technology* mengembangkan *Logger Pro* sebagai perangkat lunak untuk mengambil dan menganalisis data dari *Vernier Lab Pro 3*, yang memiliki fasilitas *Video Analysis* untuk membuat dan menganalisis grafik representasi gerak yang terlihat dalam *video*. Kontrol panel utama dari perangkat lunak secara otomatis atau manual dengan mudah dioperasikan dalam menjalankan rekaman *video* dari frame ke frame sehingga kejadian atau perubahan gejala sebagai fungsi waktu dapat teramati^[6].

Gamboa, et al.^[3] mengemukakan bahwa *VBL* merupakan alat pendidikan yang dapat memadukan aspek teoritis dan eksperimental dalam pengajaran fisika. *Video digital interaktif* dalam *VBL* memberikan kesempatan pada siswa untuk terlibat secara aktif dalam pembelajaran sains^[4]. Beichner dan Abbot^[1] berpendapat bahwa dengan melihat keduanya yaitu kejadian gerak sebenarnya dengan penyajian grafik secara abstrak dalam *VBL* maka siswa akan lebih mudah membuat hubungan kognitif bila dihadapkan pada munculnya miskonsepsi terhadap gerak. Bertolak dari pendapat tentang kelebihan ini dan hasil studi yang menunjukkan kesulitan peserta didik terhadap pemahaman grafik, penulis termotivasi untuk melakukan studi terhadap *VBL* dalam menganalisis gejala fisika tentang gerak ditinjau dari aspek kinematika dan turut memperkenalkan penggunaan *VBL* dalam pengajaran fisika, yang dapat dikembangkan sebagai alat bantu pengembangan ketrampilan interpretasi grafik kinematika.

B. Tata Kerja Video Based Laboratory (VBL)

Perangkat yang digunakan *VBL* dalam melakukan analisis fenomena/gejala fisika dari yang rekaman *video digital* terdiri dari perangkat lunak *video analysis* dan perangkat keras. Di sini, perangkat lunak yang digunakan adalah *Logger Pro 3*. Perangkat lunak ini memerlukan perangkat keras berupa komputer dengan prosesor minimal *Pentium 3* atau kompatibelnya dengan sistem operasi *windows 98* atau versi

diatasnya. Perangkat keras lain yang dibutuhkan adalah *camcorder* atau digital *camera* yang memiliki fasilitas perekaman *video*.



Gambar 4.1. Perangkat *Video Based Laboratory*

Secara garis besar, prosedur kerja analisis dengan *VBL* adalah sebagai berikut:

- (1) Penyiapan dan pembuatan rekaman *video* gejala fisika,
- (2) Menjalankan rekaman video pada sistem *VBL*,
- (3) Menentukan posisi atau titik koordinat dari objek yang diamati dari *frame* ke *frame* sebagai fungsi waktu dalam kerangka acuan layar aktif video,
- (4) Menyajikan nilai koordinat dan waktu dalam bentuk tabel data atau grafik posisi terhadap waktu.

Sampel gejala fisika yang digunakan dalam kegiatan ini adalah model gerak proyektil dengan menggunakan bola basket dan model gerak harmonik sederhana dengan menggunakan sistem massa-pegas, yang sudah dalam bentuk rekaman *video*. Proses teknis analisis *video* dengan menggunakan Logger Pro 3 adalah sebagai berikut:

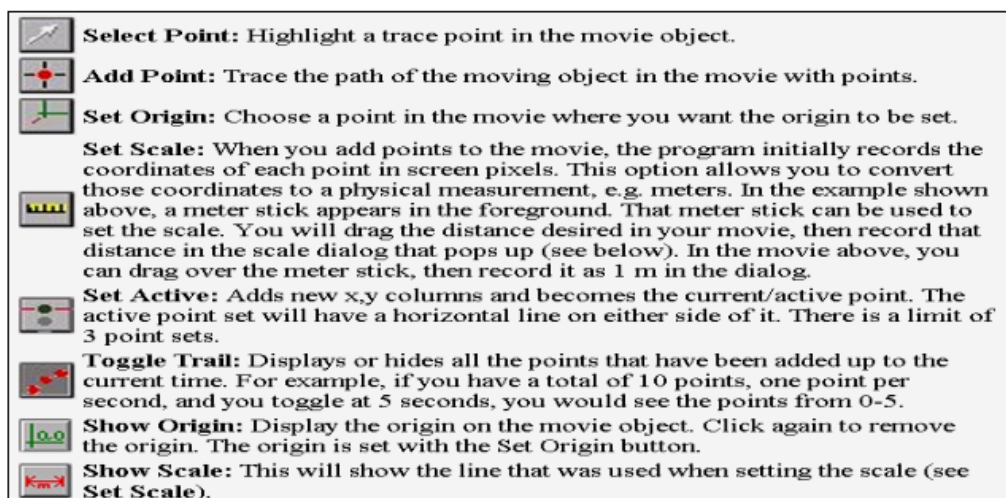
- 1) Mengaktifkan perangkat lunak Logger Pro 3
- 2) Mengaktifkan rekaman *video* gejala fisika ke layar aktif Logger Pro 3, melalui *Insert menu*, dan *Additional Object Movie*, sehingga muncul tampilan *movie player*.

Jika video gerakan bola basket yang diaktifkan, maka langkah 1 dan 2 menghasilkan tampilan di monitor seperti terlihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Tampilan Video di Layar Aktif Logger Pro 3

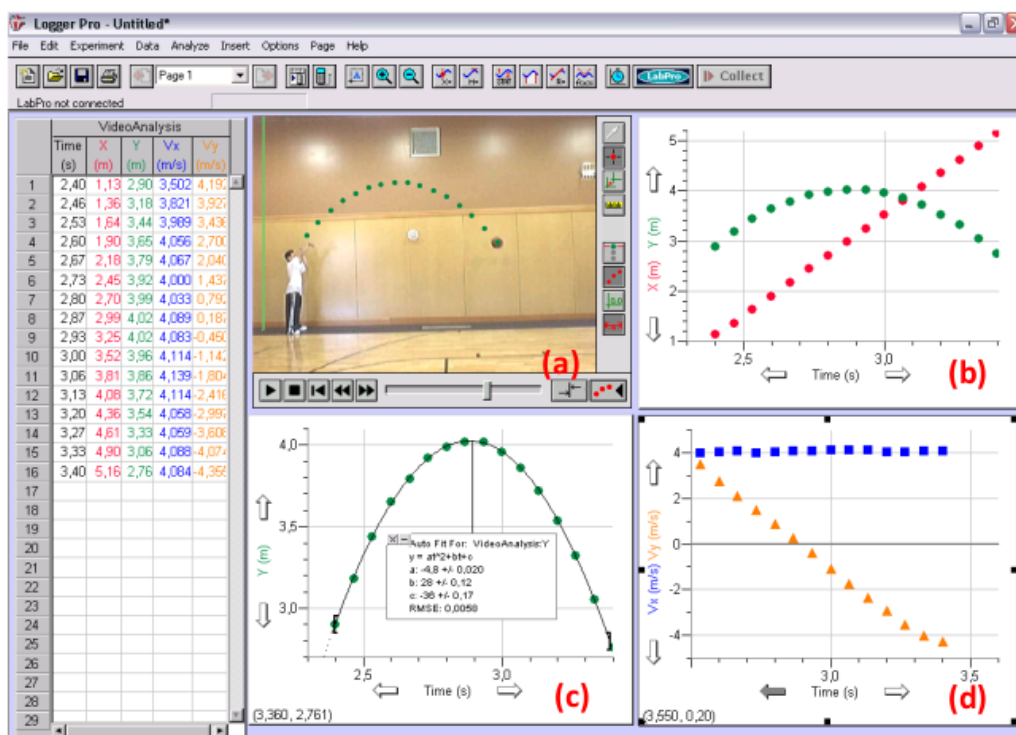
- 3) Menjalankan *video* dan melakukan *tracing* lintasan objek dengan menggunakan *Video Analysis Tools Buttons* (Gambar 4.3) untuk mendapatkan data numerik dari posisi objek sebagai fungsi waktu.
- 4) Membuat dan menganalisis grafik kinematika dengan menggunakan *Grafik Analysis Tools Buttons* dari Logger Pro 3.



Gambar 4.3. Video Analysis Tools Buttons dari Logger Pro 3

C. Hasil dan Pembahasan

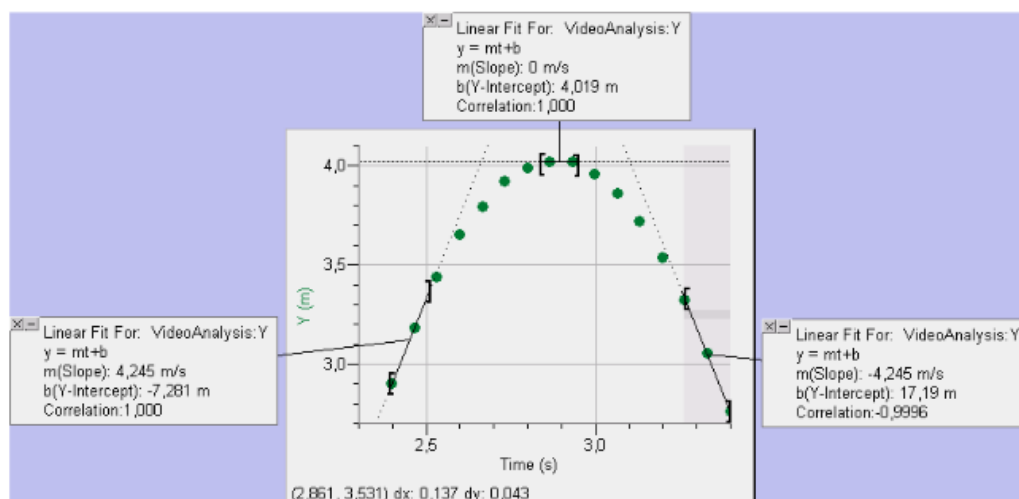
1. Hasil Analisis Video Gerak Proyektil



Gambar 4.4. Tampilan hasil analisis video gerak proyektil (bola basket) dengan LoggerPro3

Dari analisis kinematika untuk gerak proyektil didapatkan bahwa komponen gerak ke sumbu vertikal (y) merupakan gerak lurus berubah beraturan (GLBB), sedangkan komponen gerak ke sumbu horizontal (x) adalah gerak lurus beraturan (GLB). Sebagai sampel gerak proyektil adalah gerakan bola basket yang dilempar dengan kecepatan awal dan sudut elevasi tertentu (dalam rekaman *video* di Gambar 4.4a). Representasi grafik dari gerakan bola basket tersebut yang diperoleh melalui analisis *video* disajikan pada gambar 4.4b, 4.4c, dan 4.4d. Gambar 4.4b adalah grafik posisi x , dan y terhadap waktu, sedangkan gambar 4.4d adalah grafik kecepatan v_x dan v_y terhadap waktu. Dari gambar 4.4b terlihat bahwa grafik y - t mengikuti pola kuadratik yang menunjukkan bahwa gerak ke sumbu y adalah gerak lurus berubah beraturan, sedangkan grafik x - t mengikuti pola garis lurus yang menunjukkan bahwa gerakan ke sumbu x adalah gerak lurus beraturan. Hal ini dapat diamati pula pada gambar 4.4d yang ditunjukkan oleh kecepatan ke sumbu y yaitu v_y berubah terhadap waktu, sedangkan kecepatan ke sumbu x yaitu v_x konstan. Tentang gerak berubah beraturan ke sumbu y dapat dipertegas dengan melakukan pencocokan data grafik y - t ke persamaan kuadratik, yang mana hasilnya ditunjukkan pada gambar 4.4c, dengan tingkat kecocokan yang tinggi.

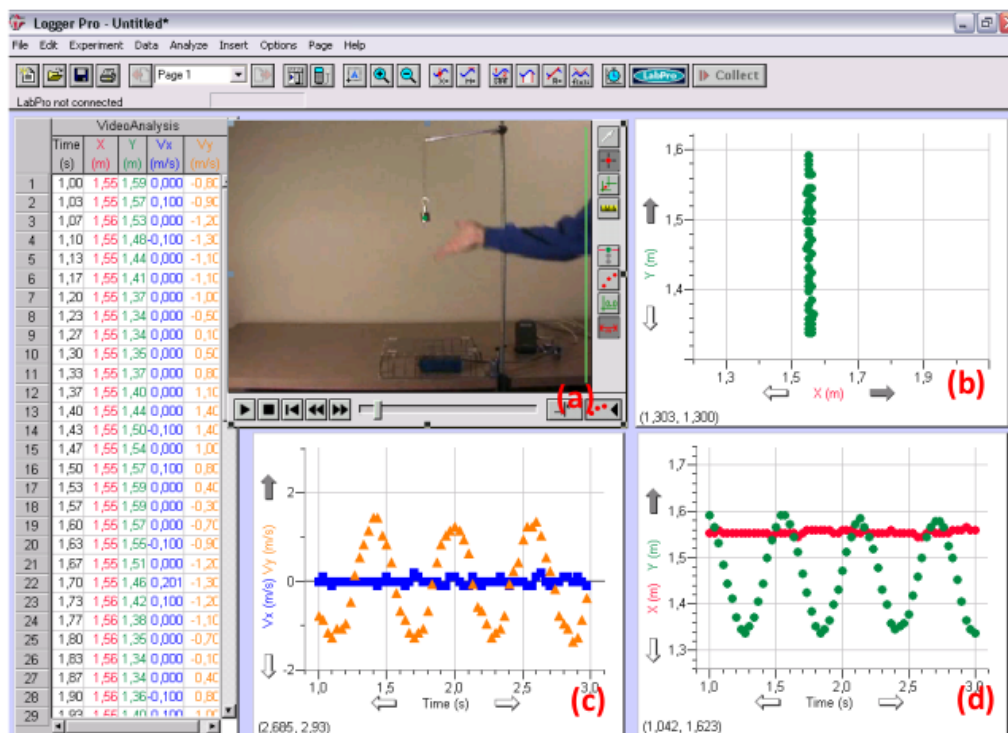
Analisis lebih lanjut dengan *VBL* terhadap *slope* dari grafik y - t , dapat ditunjukkan bahwa gerak naik dan gerak turun dari objek pada titik dengan ketinggian yang sama memiliki kelajuan yang sama, dan pada ketinggian maksimum kecepatan v_y adalah nol (seperti terlihat pada Gambar 4.5).



Gambar 4.5. Penentuan Slope pada grafik y - t dari Gerak Proyektil

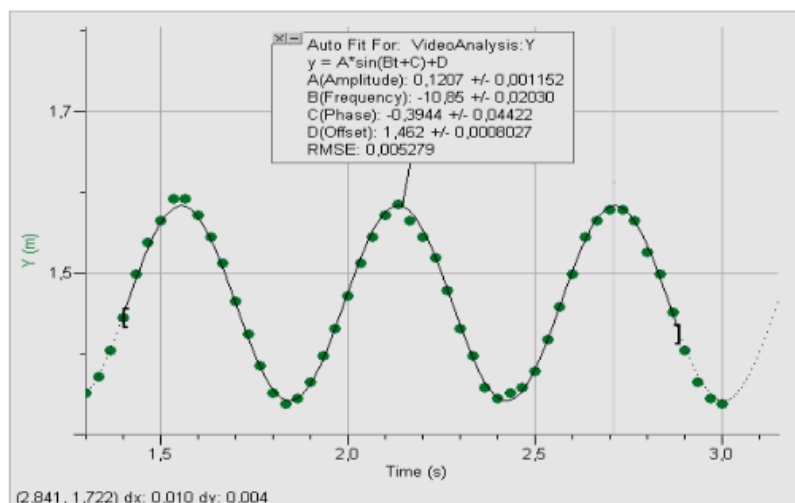
2. Hasil Analisis Video Gerak Harmonik Sederhana

Dengan VBL, karakteristik gerak harmonik sederhana seperti persamaan simpangan, kecepatan yang berubah terhadap waktu dengan mengikuti fungsi sinusoidal dengan mudah direpresentasikan. Dalam pembahasan di sini diambil contoh sistem getaran massa-pegas dengan asumsi gesekan sangat kecil sehingga dapat diabaikan (Gambar 4.6a). Grafik y - x pada Gambar 4.6b adalah hasil tracking terhadap posisi atau simpangan objek yang bergerak harmonik, yang menunjukkan bahwa objek bergerak bolak-balik dalam lintasan yang sama. Sedangkan Gambar 6.d. menunjukkan grafik perubahan nilai simpangan objek sebagai fungsi waktu terhadap titik kesetimbangan, bukan menunjukkan pola lintasan. Dengan mengamati dan memahami kedua bentuk grafik ini diharapkan peserta didik dapat dengan mudah menginterpretasi grafik terhadap kejadian fisika yang diwakilinya. Hubungan kecepatan dan posisi yaitu pada posisi atau simpangan maksimum kecepatan objek sama dengan nol dan pada simpangan nol kecepatan objek maksimum dengan mudah diamati pada grafik v - t dan grafik y - t dalam gambar 4.6c dan 4.6d.



Gambar 4.6. Tampilan Hasil Analisis Video Gerak Harmonik Sederhana dari Sistem Massa Pegas dengan Logger Pro 3

Nilai simpangan yang berubah secara sinusoidal, secara eksplisit bentuk persamaannya dapat diperoleh dengan melakukan pencocokan titik-titik data dari grafik $y-t$. Hasil pencocokan data terhadap fungsi sinus memiliki tingkat kecocokan yang tinggi (seperti terlihat pada Gambar 4.7).



Gambar 4.6. Hasil Pencocokan Data ke Fungsi Sinus dari Grafik $y-t$

D. Kesimpulan

Berdasar pada kegiatan pengamatan dan analisis terhadap gejala fisika dengan *VBL* terungkap potensi terapannya untuk proses pembelajaran sebagai berikut: (1) Penguatan informasi tentang gejala fisika dan bagian-bagian penting dari gejala ini yang menjadi objek studi mudah dilakukan, oleh karena objek sudah dalam bentuk rekaman *video* digital sehingga mudah dijalankan secara random dan interaktif serta dapat diatur kecepatan penayangannya. Proses kognitif untuk memahami objek studi dapat disesuaikan dengan potensi atau kecepatan belajar seseorang. (2) Dalam kajian kinematika terhadap gejala fisika, proses abstraksi dari gejala ke representasi grafik kinematika secara bertahap teramati secara simultan melalui tayangan *video*, proses kuantisasi besaran yang tersaji dalam tabel dan visual pembentukan grafik. Bertolak dari kedua hal ini dapat disimpulkan bahwa *VBL* dapat berperan besar dalam upaya pengembangan ketrampilan interpretasi terhadap grafik kinematika.

E. Pustaka

- [1] Beichner, R. J., and Abbott, D. S., 1999, Video-Based Labs for Introductory Physics Courses, JCST November 99. http://www.ncsu.edu/per/articles/jcst9911_101.pdf
- [2] Grayson, D. J., and McDermott, 1996, Use of the Computer for Research on Student Thinking in Physics, Am. J. Phys. 64(5), May 1996, 557-565.
- [3] Gamboa, F., et al., 1999, Specification and Development of A Physics Video Based Laboratory, Instrumentation and Development Vol. 4 Nr. 5.
- [4] Escalada, L. T., et al., 1996, Application of Interactive Digital Video in a Physics Classroom, Journal of Educational Multimedia and Hypermedia, 5(1), 73-97. <http://www.phys.ksu.edu/perg/papers/applicat.html>
- [5] Zollman, D. A. and Fuller, R. G., 1994, Teaching and Learning Physics with Interactive Video, Physics Today, 47(4), 41-47. <http://www.phys.ksu.edu/perg/dvi/pt/intvideo.html>
- [6] Vernier International, 2004, Data Collection with Computer and Handhelds 2004 Catalog. <http://www.vernier-intl.com>

PENGUKURAN FREKUENSI TANGGA NADA INSTRUMEN MUSIK DENGAN SISTEM *MICROCOMPUTER BASED LABORATORY*

Ishafit, Khairil Anwar, dan Moh. Toifur

Intisari - Pengukuran frekuensi tangga nada, perbedaan rasio dalam tangga nada, dan pola matematis hubungan tangga nada terhadap frekuensi bunyi dari instrumen musik *Keyboard Elektronik* (Organ) telah dilakukan. Subjek penelitian ini adalah instrumen musik Organ merk Yamaha PSR-172 dengan spesifikasi bunyi (*voice*): 073-Horn, Trp = Split, yang memiliki nilai ketetapan secara internasional. Data bunyi instrumen musik diukur dengan sistem akuisi data *Microcomputer Based Laboratory* (MBL) berbasis *interface* Vernier LabPro dan *software* LoggerPro 3. Data yang diperoleh kemudian dianalisis secara matematis berdasarkan fungsi dan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT). Hasil pengukuran dengan sistem MBL memberikan tingkat ketelitian yang baik karena nilai frekuensi tangga nada tidak berbeda signifikan terhadap nilai teoritisnya, dengan rata-rata penyimpangan sebesar 0,22 %. Dari hubungan tangga nada terhadap frekuensi diperoleh pola hubungan eksponensial dengan persamaan $f = 247.24e^{0.0579n}$.

Abstrack – Measurements of musical scale frequency, musical scale differential ratio, and mathematics pattern correlation to the sound frequency of electronic keyboard have been done. The subject of this study is Yamaha PSR-172 organ with voice specification: 073-Horn, Trp = Split, which has international Constancy. The data gained by using Microcomputer Based Laboratory (MBL) data acquisition system based on Vernier LabPro Interface and Logger Pro 3 software. The gained data mathematically analyzed with function and algorithm of Fast Fourier Transform (FFT). The result provides a good level of accuracy due to the musical scale frequency did not significantly differ to the theoretical value, with deviation of 0.22%. Based on the correlation of musical scale and the frequency, it has exponential function as $f = 247.24e^{0.0579t}$.

A. Pendahuluan

Bunyi selalu berhubungan dengan indra pendengar kita, berarti juga dengan sensasi fisik yaitu fisiologi telinga dan fisiologi otak yang menterjemahkan sensasi yang merangsang mencapai telinga. Kita mendengar bunyi karena adanya gangguan yang menjalar ke telinga. Getaran udaralah yang memaksa gendang telinga kita bergetar. Karena gangguan ini, selaput kendang telinga kita bergetar dan getaran ini berubah menjadi denyut listrik yang dilaporkan ke otak lewat urat syaraf. Bentuk gelombang yang kira-kira periodik atau terdiri dari sejumlah kecil komponen yang kira-kira periodik akan menimbulkan suatu sensasi yang menyenangkan (jika intensitasnya tidak terlalu tinggi) seperti bunyi musik, sedangkan bunyi yang mempunyai bentuk gelombang yang tidak periodik akan terdengar sebagai derau (*noise*). Pada contoh bunyi alat musik dihasilkan warna bunyi yang bagus dan teratur untuk didengarkan dan dinikmati, hal ini disebabkan karena bunyi yang terbentuk telah ditetapkan nilai frekuensinya sehingga keharmonisannya juga teratur, di mana

tiap warna bunyi dengan frekuensi tertentu ini dinamakan nada, yang juga memiliki jarak antara nada satu dengan berikutnya teratur.

Karakteristik dan besarnya frekuensi gelombang bunyi yang dihasilkan dari tiap nada alat musik tidak mampu diamati secara langsung dengan alat sederhana biasa apalagi dengan kemampuan manusia, maka hal ini merupakan salah satu fenomena yang sesuai dan perlu untuk diamati dengan alat-alat bantu yang berbasis komputer. Pada makalah ini dikaji penerapan sistem akuisisi data berbasis komputer yaitu sistem *Microcomputer Based Laboratory* (MBL) pada pengukuran frekuensi tangga nada instrumen musik berupa Organ Elektronik. Permasalahan yang dikemukakan adalah: Bagaimanakah hasil pengukuran nilai frekuensi tangga nada instrumen musik organ dengan sistem MBL?, bagaimanakah perbedaan rasio dan kesesuaian nilai frekuensi tangga nada terukur dengan ketetapan terhadap skala nada-nada diatonik dan kromatik?, dan bagaimana pola matematis dari frekuensi tangga nada yang dihasilkan?. Tujuan eksperimen ini adalah menguji sistem MBL dan mengukur frekuensi tangga nada instrumen musik *Keyboard* Elektronik (Organ), menguji perbedaan rasio dan kesesuaian nilai frekuensi tangga nada instrumen musik organ terukur dengan ketetapan, menentukan model matematika tangga nada yang digunakan dalam skala-skala musik.

B. Kajian Teori

1. Gelombang Bunyi

Dari semua gelombang mekanik yang ada di alam, yang akrab dalam kehidupan kita sehari-hari adalah gelombang longitudinal. Gelombang longitudinal dalam sebuah medium biasanya udara, dinamakan gelombang bunyi, lebih khususnya dikenal dengan gelombang akustik. Sebagai mana dikemukakan oleh Hermann Helmholtz (1821-1894) yang teori dan usahanya dilanjutkan oleh Lord Rayleigh (1842-1919) mengutarakan bahwa, akustik merupakan cabang dari ilmu fisika dan ilmu teknik yang berkonsentrasi tentang timbul dan merambatnya bunyi, tentang

sifat proses pendengaran, tentang alat-alat untuk mengukur, merekam dan memproduksi bunyi, serta tentang konstruksi auditorium yang memenuhi syarat pendengaran yang baik, baik secara teori maupun matematis. Alasannya bahwa telinga manusia sangat peka dan dapat mendeteksi gelombang bunyi walau intensitasnya sangat rendah^[1]. Fenomena bunyi memiliki tiga aspek penting dalam pembahasannya, yang pertama pasti ada sumber bunyi yang merupakan benda yang bergetar. Kedua, energi dipindahkan dari sumber bunyi dalam bentuk gelombang bunyi longitudinal, dan ketiga bunyi dideteksi oleh telinga atau sebuah alat^[2].

Gelombang bunyi merupakan gelombang tiga dimensi, karena medium gelombangnya bersifat tiga dimensi, dimana gelombang mengalir ke luar dari sumber ke semua arah. Jadi, gelombang bunyi dapat menjalar di dalam ruang tiga dimensi (misalnya: gelombang gempa bumi, gelombang cahaya dan gelombang bunyi yang merambat di udara terbuka). Suatu sumber titik di permukaan air medium dua dimensi menghasilkan gelombang lingkaran, artinya muka gelombangnya berbentuk lingkaran. dalam medium tiga dimensi dan jika medium tersebut isotropik (sama ke semua arah), sumber titik akan menghasilkan gelombang bola, artinya muka gelombang yaitu tempat kedudukan titik-titik dalam medium dengan fasa sama mempunyai bentuk bola. Suatu sumber berupa pelat yang bergetar akan menghasilkan gelombang dengan muka gelombang berupa bidang datar, gelombang semacam ini disebut gelombang datar^[3].

Bentuk gelombang yang kira-kira periodik atau terdiri dari sejumlah kecil komponen yang kira-kira periodik akan menimbulkan suatu sensasi yang menyenangkan (jika intensitasnya tidak terlalu tinggi) seperti bunyi musik, sedangkan bunyi yang mempunyai bentuk gelombang yang tidak periodik akan terdengar sebagai derau (*noise*)^[4].

a. Karakteristik Bunyi

Yang kita kenal sebagai bunyi sebetulnya ialah gelombang mekanik longitudinal dengan frekuensi dalam daerah pendengaran kita (frekuensi *audio*), yaitu antara 20 Hz sampai kira-kira 20.000 Hz. Gelombang mekanik longitudinal dengan frekuensi di bawah daerah pendengaran disebut gelombang *infrasonik* dengan frekuensi kurang dari 20 Hz, gelombang semacam ini biasanya dihasilkan oleh sumber yang besar, misalnya gempa bumi, guntur, gunung berapi, dan gelombang yang dihasilkan oleh getaran mesin-mesin yang berat. Gelombang frekuensi rendah ini meskipun tidak dapat terdengar namun berkerja dengan cara resonansi, sehingga dapat menyebabkan gerakan dan iritasi yang cukup besar pada organ-organ di dalam tubuh sehingga menyebabkan kerusakan pada tubuh manusia.

Untuk frekuensi di atas daerah pendengaran, gelombang bunyi yang frekuensinya di luar jangkauan ini mungkin dapat terdengar mencapai telinga, tetapi biasanya kita tidak menyadarinya. Gelombang mekanik longitudinal ini disebut gelombang *ultrasonik* yang mempunyai rentang frekuensi di atas 20.000 Hz. Gelombang ultrasonik ini dapat dihasilkan oleh getaran mekanik pada kwarsa yang diberi tegangan listrik bolak-balik dengan frekuensi *ultrasonik*. Dengan cara seperti ini orang dapat menghasilkan gelombang mekanik dengan frekuensi setinggi 6×10^8 Hz, dengan panjang gelombang kira-kira sebesar 5×10^{-3} cm, sama besarnya dengan panjang gelombang cahaya. Gelombang ultrasonik ini sering dipergunakan untuk pemeriksaan kualitas produksi dalam industri dan beberapa aplikasi dalam ilmu kedokteran^[3].

b. Bunyi pada Instrumen Musik

Skala musik yang digunakan dalam musik dunia barat yang berawal pada peradaban zaman yunani kuno, aslinya terdapat 7 (tujuh) nada dasar pada sebuah skala. Nada ini disebut dengan suatu nada *diatonik* dan biasanya musisi

amatir (bukan musisi asli) mengenalnya sebagai *do-re-mi-fa-sol-la-si-do*. Skala ini dapat dimainkan dengan tombol-tombol putih pada papan piano/keybord, yang dimulai dengan C. Perbandingan frekuensi antara dua nada yang berurutan disebut suarantara, yang mana mempunyai harga:

<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15	

Suarantara yang terkecil yaitu 16/15 disebut suarantara setengah nada sedangkan 9/8 dan 10/9 disebut suarantara satu nada, susunan nada seperti diatas disebut tangga nada diatonik. Selain nada tersebut ada juga tangga nada dengan suarantara tetap yang disebut tangga nada kromatik. Interval *octav* dengan *prime* dibagi menjadi 12 suarantara yang sama, jadi masing-masing besarnya $\sqrt[12]{2} = 1,06$. Frekuensinya hampir sama dengan tangga nada diatonik dan diberi nama;

<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
sis	dis		fis	gis	ais		
(des)	(eis)		(ges)	(as)	(bes)		

Supaya dapat memainkan berbagai alat musik bersama-sama, tiap nada harus mempunyai tinggi tertentu, pada tahun 1939 oleh dunia internasional telah ditetapkan frekuensi sesuatu nada sebagai standar yaitu "A" (standar) atau "A" (normal) yang memiliki frekuensi 440 Hz sehingga frekuensi deret nada adalah;^[5].

do	re	mi	fa	sol	la	si	do
<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
262	294	330	349	392	440	494	524

sebagai mana kita melewati skala diatonik yang berjumlah 8 (delapan) langkah dari do kembali ke do lagi, berdasarkan alasan ini, jarak antara nada nya disebut dengan *Octav*.

Nada adalah bunyi tunggal yang berasal dari sumber bunyi yang mempunyai ferkuensi tetap, istilah nada digunakan dalam seni suara dan musik untuk membedakan dengan bunyi pada umumnya. Musik atau lagu-lagu didasarkan pada nada-nada yang tergabung dalam susunan tangga nada. Tangga nada diatonik digunakan pada musik barat didasarkan pada not-not 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, i. Not-not ini diberi nama dengan huruf *c, d, e, f, g, a, b, c* . Perbandingan frekuensi nada-nada ini adalah: 24, 27, 30, 32, 36, 40, 45, 48. Setiap nada mempunyai jarak interval yang teratur yang merupakan perbandingan antara frekuensi suatu nada dengan nada lain yang lebih rendah, jadi interval merupakan bilangan yang lebih besar dari pada satu.

Dalam teori musik hanya dipergunakan suatu kombinasi nada yang tertentu saja yang frekuensinya mempunyai perbandingan tertentu dan merupakan suatu tangga nada. Sesuai dengan pendapat tokoh filsafah yunani kuno, Anaximandros mengungkapkan bahwa perbandingan nada-nada di atas adalah sebagai berikut:

- a) $\frac{c}{c} = \frac{24}{24} = 1$: Prime (Nada c adalah prime dari c)
- b) $\frac{d}{c} = \frac{27}{24} = \frac{9}{8}$: Sekonde (Nada d adalah sekonde dari c)
- c) $\frac{e}{c} = \frac{30}{24} = \frac{5}{4}$: Terst (Nada e adalah terst dari c)
- d) $\frac{f}{c} = \frac{32}{24} = \frac{4}{3}$: Quart (Nada f adalah quart dari c)
- e) $\frac{g}{c} = \frac{24}{24} = \frac{3}{2}$: Quint (Nada g adalah quint dari c)
- f) $\frac{a}{c} = \frac{40}{24} = \frac{5}{3}$: Sext (Nada a adalah sext dari c)

g) $\frac{b}{c} = \frac{45}{24} = \frac{15}{8}$: Septime (Nada b adalah septime dari c)

h) $\frac{c^1}{c} = \frac{48}{24} = 2$: Octaf (Nada c^1 adalah octaf dari c)

Pada waktu selanjutnya, seiring perkembangan peradaban dan teknologi, ada 5 (lima) nada lagi yang ditambahkan pada skala musik dunia barat. Sehingga ada dua belas (12) nada harmonis pada alat musik ini dengan frekuensi yang pasti berbeda-beda. Kedua belas (12) skala nada ini disebut dengan suatu skala *chromatic*. Untuk sebuah skala yang dimulai dengan C, 5 nada tambahan dimainkan pada sebuah *keyboard* piano/organ dengan menekan tombol-tombol hitam.

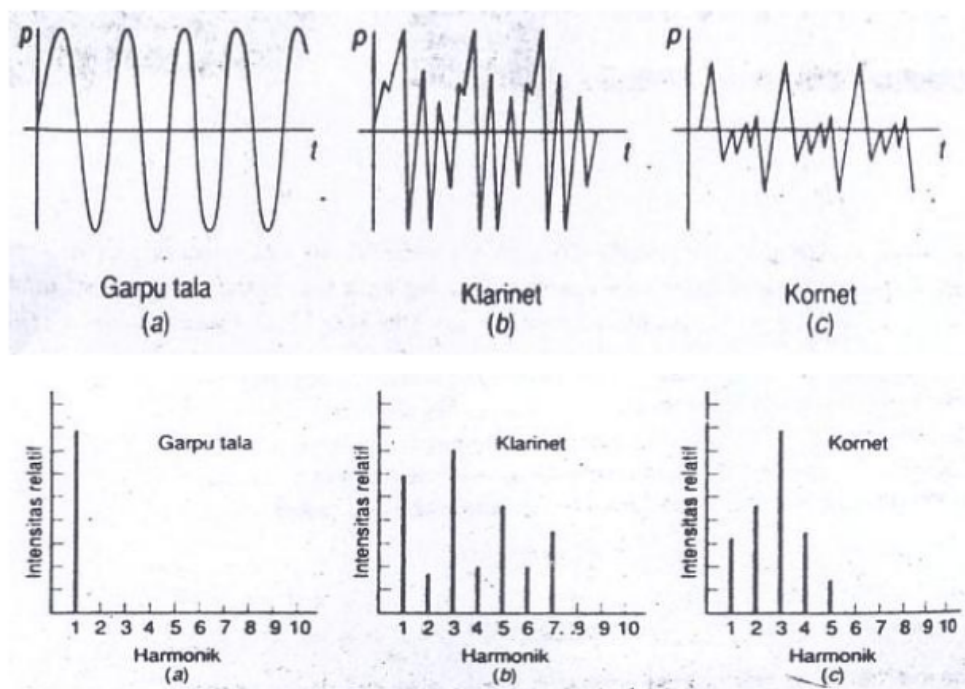
Frekuensi yang biasa untuk not-not musik pada apa yang disebut skala kromatik dengan kenyaringan yang sama, diberikan pada tabel dibawah ini untuk *octav* yang dimulai dengan C tengah. Dimana satu *octav* berarti menggandakan frekuensi seperti pada nada C tengah dengan $C'^{[2]}$.

Tabel 5.1. Skala kromatik dengan kenyaringan yang sama untuk satu octaf^[2]

Not	Frekuensi (Hz)
C	262
C [#] atau D ^b	277
D	294
D [#] atau E ^b	311
E	330
F	349
F [#] atau G ^b	370
G	392
G [#] atau A ^b	415
A	440
A [#] atau B ^b	466
B	494
C'	524

2. Analisis dan Sistesis Harmonik

Dua alat musik yang berbeda dibunyikan dengan frekuensi nada yang sama, akan menghasilkan bunyi yang berbeda. Kedua nada mempunyai titik nada yang sama yang merupakan rangsangan fisiologi frekuensi yang terdengar dimana semakin tinggi frekuensi maka semakin tinggi titik nada. Namun kedua nada itu berbeda dalam hal yang disebut kualitas nada, alasan utama yang menyebabkan hal tersebut adalah karena masing-masing alat musik menghasilkan harmonik yang memiliki intensitas relatif yang bergantung pada jenis alat musik dan bagaimana alat musik tersebut dimainkan. Perbedaan kualitas nada berhubungan erat dengan bentuk gelombang yang dihasilkan, sebagai contoh bentuk gelombang bunyi yang dihasilkan beberapa alat musik yang dibunyikan pada tingkat frekuensi yang sama diperlihatkan pada gambar di bawah ini.



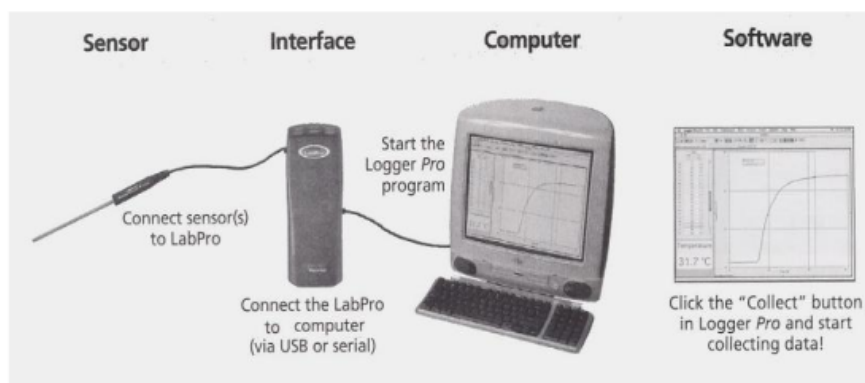
Gambar 5.1. Bentuk gelombang berbagai alat musik pada frekuensi sama 440 Hz

Bentuk gelombang yang dihasilkan dapat dianalisis menurut harmonik-harmonik yang menyusun gelombang tersebut, analisis seperti ini disebut analisis harmonik

atau juga disebut analisis fourier yang secara matematika menganalisis fungsi–fungsi periodik. Kebalikan dari analisis harmonik adalah sintesis harmonik, yang merupakan konstruksi gelombang periodik dari komponen-komponen harmoniknya. Semakin banyak harmonik yang digunakan dalam suatu sintesis maka semakin baik pendekatannya terhadap bentuk gelombang sesungguhnya^[5].

C. Eksperimen

Instrumen yang digunakan dalam eksperimen ini adalah system akuisisi data berbasis komputer yang dikenal dengan istilah system MBL (*Microcomputer Based Laboratory*), yang terdiri dari unit sensor (berupa *microphone*), interface (Vernier LabPro), komputer, dan software akuisisi data (Vernier LoggerPro 3.2). Diagram system MBL sebagaimana gambar 5.2.



Gambar 5.2. Diagram Instrumen sistem MBL

Subjek eksperimen ini adalah instrumen musik Organ merk Yamaha PSR-172 dengan spesifikasi bunyi (*voice*): 073-Horn, Trp = Split, yang memiliki nilai ketetapan secara internasional. Nada C₄ digunakan sebagai nada acuan (nada dasar), yang frekuensi akan diperoleh sekitar 261-265 Hz. Sampel bunyi yang digunakan adalah nada-nada sesuai dengan tabel 5.1.

Dari rekaman bunyi yang diperoleh dilakukan analisis dengan FFT, yang sudah tersedia dalam software LoggerPro 3.2, untuk mendapatkan nilai frekuensi dari

masing-masing nada. Nilai rerata dari frekuensi tiap nada dihitung sesuai dengan rentangnya, dengan persamaan

$$f_{\text{Nada}} = \frac{a+b}{2} \quad (5.1)$$

dimana, f_{Nada} = frekuensi tiap nada (Hz), a = batas minimum (Hz), dan b = batas maximum (Hz). Perbedaan frekuensi tiap-tiap nada (kecuali nada yang pertama) terhadap satu nada sebelumnya dihitung dengan persamaan:

$$\Delta f = f_n - f_{n-1} \quad (5.2)$$

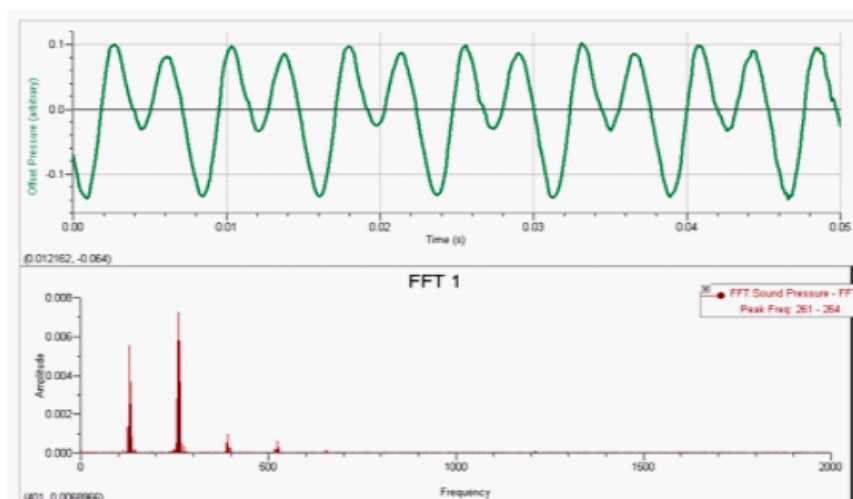
dimana, Δf = selisih frekuensi nada (Hz), f_n = frekuensi nada ke- n ($n = C_4, C_4\#, \dots$) dan f_{n-1} = frekuensi nada sebelum nada ke- n . Perbandingan setiap frekuensi dari tangga nada dengan membagi frekuensi setiap nada dengan frekuensi nada C_4 , yaitu :

$$\text{Rasio Nada } C_4 = \frac{f_n}{f_{C_4}} \quad (5.3)$$

dimana, f_n = frekuensi nada ke- n ($n = C_4, C_4\#, \dots$), dan f_{C_4} = frekuensi nada C_4 .

D. Hasil dan Pembahasan

Salah satu hasil pengukuran menggunakan sistem MBL disajikan pada gambar 5.3.



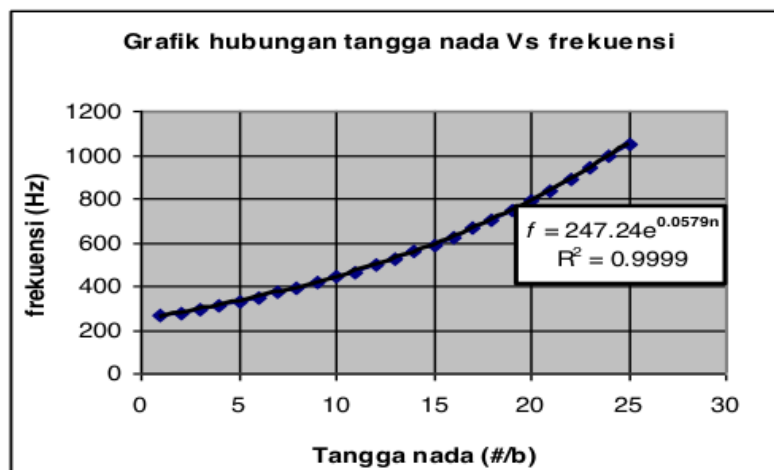
Gambar 5.3. Hasil Pengukuran untuk Nada C4

Setelah data dianalisis, diperoleh nilai frekuensi tangga nada instrumen musik Keyboard Elektronik (Organ) Yamaha PSR-172 dengan spesifikasi bunyi (voice): 073-Horn, Trp = Split, sebagai berikut:

Tabel 5.2. Skala kromatik dengan kenyaringan yang sama untuk satu oktaf (Giancoli, 1998)

No.	Nada	f_r (Hz)	Δf_r (Δ Hz)	Rasio tiap nada dengan nada sebelumnya	Rasio tiap nada dengan nada C_4	Rasio terhadap C_4 jika intonasi	Pembulatan dengan pecahan	Kesalahan relatif terhadap teori (%)
1	C_4	262,5			1	1	1 1/1	0,19
2	$C_4^\sharp$	277	14,5	1,06	1,06			0
3	D_4	294	17	1,06	1,12	1,12	1,12 9/8	0
4	E_4^b	314	20	1,07	1,2			0,96
5	E_4	331	17	1,05	1,26	1,26	1,25 5/4	0,3
6	F_4	348	17	1,05	1,33	1,33	1,33 4/3	0,29
7	$F_4^\sharp$	370	22	1,06	1,41			0
8	G_4	392	22	1,06	1,49	1,49	1,5 3/2	0
9	A_4^b	416	24	1,06	1,58			0,24
10	A_4	443	27	1,06	1,69	1,69	1,66 5/3	0,68
11	B_4^b	465	22	1,05	1,77			0,21
12	B_4	497	32	1,07	1,89	1,89	1,87 15/8	0,61
13	C_5	526	29	1,06	2	2	2 2/1	0,38

Jika dihubungkan nada dengan besarnya frekuensi dalam tangga nada tersebut, dapat digambarkan suatu pola grafik hubungan antara keduanya, seperti yang terlihat pada gambar 5.4 di bawah ini.



Gambar 5.4. Grafik hubungan Tangga Nada dengan Frekuensi

Sehingga pola grafik berbentuk eksponensial. Dari grafik ini dihasilkan suatu persamaan matematis yang berkaitan dengan model eksponensial. Hasil dari persamaan ini diperoleh sebagai: $f = 247,24e^{0.0579n}$. Persamaan ini dapat difungsikan untuk menentukan nilai frekuensi dari tangga nada pada *octav* yang lebih rendah atau *octav* yang lebih tinggi pada instrumen musik Keyboard Elektronik (Organ) Yamaha PSR-172.

E. Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen dapat ditarik kesimpulan bahwa pengukuran frekuensi instrumen musik Elektronik *Keyboard* (Organ) Yamaha PSR-172. sebagai berikut, yaitu: pengukuran frekuensi tangga nada suatu instrumen musik Elektronik *Keyboard* (Organ) dengan sistem MBL-FFT memberikan tingkat ketelitian yang baik, perbedaan rasio frekuensi antara tangga nada Elektronik *Keyboard* (Organ) adalah sesuai dengan ketetapan, dan nilai frekuensi dari setiap nada identik dengan nilai frekuensi teoritisnya, dengan prosentase kesalahan rata-rata sebesar: 0,22 %, dan pola atau persamaan matematis yang diperoleh dari hubungan tangga nada dengan frekuensi adalah $f = 247,24e^{0.0579n}$.

F. Pustaka

- [1] Sears and Zemansky. *University Physics*. Erlangga: Jakarta.
- [2] Giancoli, D. C., 1998, *Fisika*, Jilid 1. Erlangga : Jakarta.
- [3] Sutrisno, 1979, *Seri Fisika Dasar Gelombang dan Optik*. ITB : Bandung.
- [4] Resnick, R. dan Halliday, D., 1997, *Fisika*. Jilid 2. Erlangga : Jakarta.
- [5] Tipler, P. A., 2001, *Fisika Untuk Sains dan Teknik*, jilid 1. Erlangga : Jakarta.

EKSPERIMEN EFEK DOPPLER DARI SUMBER BUNYI BERGERAK LURUS DENGAN SISTEM *MULTIMEDIA BASED LABORATORY*

Ishafit

Intisari - Pengujian Efek Doppler dari sumber bunyi bergerak lurus telah dilakukan dengan Sistem *Multimedia Based Laboratory* (MBL). Sumber bunyi berasal dari klakson mobil yang bergerak lurus dalam bentuk rekaman video. Kecepatan sumber bunyi diperoleh dari hasil analisis video terhadap rekaman gerak mobil dengan software Tracker, sedangkan frekuensi bunyi ketika sumber mendekati dan menjauhi pendengar diperoleh dari hasil analisis rekaman bunyi klakson dengan *software Audacity* dan *Overtone Analyzer*. Hasil pengujian Efek Doppler menunjukkan bahwa nilai eksperimental memiliki tingkat kesesuaian yang baik dengan nilai prediksi teoritisnya, dengan ralat relatif sebesar 0,85 %.

Abstract – Testing of Doppler effect with straight moved sound source have been done with Multimedia Based Laboratory (MBL) system. The source of the sound come from a horn of a car which move straight recorded in a video form. Source velocity gained by analyzing the video using Tracker software, meanwhile the

frequency of the horn analyzed using Audacity and Overtone Analyzer. The result shows that experimental value has a good level of accuracy with the theoretical prediction, with relative error 0.85%.

A. Pendahuluan

Gejala Efek Doppler (*Doppler Effect*) adalah gejala perbedaan frekuensi gelombang yang diterima oleh pengamat terhadap frekuensi gelombang yang dipancarkan oleh sumber, ketika terdapat gerak relatif antara penerima/pengamat dengan sumber gelombang. Gejala ini akan termati misalnya bila mobil membunyikan klakson. Nada klakson akan terdengar meninggi ketika mobil mendekati pendengar dan menurun ketika mobil melewati pendengar. Gejala ini pertama kali dijelaskan oleh ilmuwan Austria yaitu Chritian Doppler pada abad ke-19, sehingga dinamakan Efek Doppler. Efek serupa terjadi pula pada gelombang elektromagnetik seperti cahaya dan gelombang radio^[1].

Gejala Efek Doppler merupakan salah satu gejala penting dalam fisika dan memiliki penerapan sangat luas, diantaranya dalam pengukuran tak merusak (*non destructive*) dan tak kontak (*contactless*) dengan objek misalnya dalam bidang transportasi untuk mendeteksi kelajuan tinggi mobil. Dalam bidang medis, metode ini diaplikasikan untuk mendeteksi kelajuan aliran darah^[2]. Aplikasi Efek Doppler untuk gelombang radio adalah alat radar pada mobil polisi untuk mengukur laju mobil. Gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh alat radar direfleksikan dari sebuah mobil yang bergerak yang bertindak sumber bergerak. Efek Doppler untuk gelombang elektromagnetik, termasuk cahaya tampak, penting dalam astronomi, yaitu dapat mengamati laju pergerakan bintang dalam galaksi. Cahaya dari kebanyakan galaksi bergeser menuju panjang gelombang yang lebih besar atau ujung merah dari spektrum tampak, yang dinamakan pergeseran merah (*red shift*). Hal ini dinyatakan sebagai pergeseran Doppler yang diakibatkan oleh gerak galaksi yang menjauhi bumi^[1].

Untuk menganalisis Efek Doppler pada bunyi dilakukan dengan mencari hubungan antara pergeseran frekuensi, kecepatan sumber dan pendengar relatif terhadap medium (biasanya udara). Untuk menyederhanakan persoalan akan ditinjau kasus khusus yaitu kecepatan sumber dan pendengar terletak sepanjang garis lurus yang menghubungkan keduanya. Misalkan f_s adalah frekuensi bunyi sumber, v_s dan v_p adalah kecepatan sepanjang garis yang masing-masing untuk sumber dan pendengar, relatif terhadap medium. Untuk pendengar yang bergerak, frekuensi bunyi yang diterima oleh pendengar f_p adalah:

$$f_p = \frac{v + v_p}{\lambda} \quad (6.1)$$

$$f_p = \frac{v + v_p}{v / f_s} \quad (6.2)$$

dalam hal ini v adalah kecepatan rambat bunyi di medium. Seorang pendengar yang bergerak menuju sumber $v_p > 0$ sehingga mendengar bunyi dengan frekuensi yang lebih tinggi. Seorang pendengar yang bergerak menjauhi sumber $v_p < 0$, sehingga mendengar bunyi dengan frekuensi yang lebih rendah^[1]. Untuk kasus sumber bunyi dan pendengar sama-sama bergerak relatif terhadap yang lain, frekuensi yang diterima oleh pendengar adalah:

$$f_p = f_s \frac{v \pm v_p}{v \mp v_s} \quad (6.3)$$

Tanda sebelah atas berlaku jika sumber dan/atau pengamat saling mendekat, tanda sebelah bawah berlaku jika mereka saling menjauh^[3].

Dalam makalah ini disajikan pengujian Efek Doppler untuk kasus sumber bunyi bergerak dan pendengar diam. Jika bunyi dengan frekuensi f_s dipancarkan dari sumber bunyi yang bergerak lurus dengan kecepatan v_s dan pendengar diam maka dapat ditunjukkan bahwa nilai rasio f_F (frekuensi yang diterima ketika sumber mendekati pendengar) terhadap f_B (frekuensi yang diterima ketika sumber menjauhi pendengar) memenuhi persamaan:

$$\frac{f_F}{f_B} = \frac{v + v_s}{v - v_s} \quad (6.4)$$

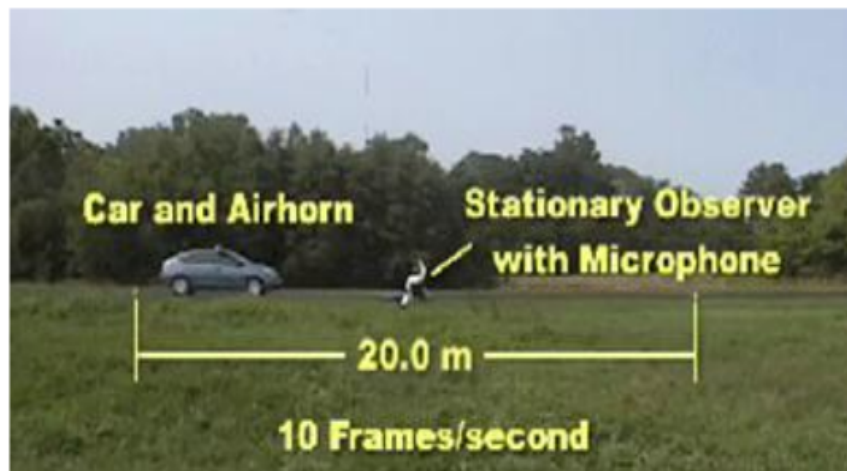
Sehingga dari persamaan (6.4) dapat dibuktikan bahwa jika Efek Doppler berlaku maka nilai esperimental f_F/f_B sama dengan nilai prediktifnya yang diperoleh dari rasio $(v+v_s)/(v-v_s)$.

B. Metode Penelitian

Perkembangan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) dari teknologi informasi dan komunikasi atau multimedia menghadirkan kemudahan pada proses eksperimen fisika, termasuk ekseperimen bidang bunyi. Komputer yang dilengkapi dengan built-in sound card, digital video camera, dan perangkat lunak analisis audio-video dengan mudah difungsikan sebagai sistem akusisi data berbasis multimedia (*Multimedia Based Laboratory*) dalam topik-topik eksperimen yang terkait dengan gejala bunyi.

1. Bahan dan Peralatan

Bahan dan peralatan multimedia yang digunakan dalam penelitian ini ialah: (1) Bahan berupa rekaman *video* (CarHornDoppler.mov) dari mobil yang bergerak lurus dengan mem-bunyikan klakson mendekati dan menjauhi pendengar diam dari koleksi *LivePhoto Physics Series*^[3]. (2) Peralatan berupa perangkat keras dan perangkat lunak computer, yaitu: Komputer laptop dengan spesifikasi: ACER-295BFD4BB2, OS *Windows XP HE SP-3*, *Processor*: Intel(R) Atom(TM) CPU N450 1.66GHz (2 CPUs), *Memory*: 1014MB RAM, *Speaker Active*. (Gambar 6.2); *Video Analysis Software* (Tracker)^[4]; *Audio Spectrometer Software Audacity 1.2.6*^[5] dan *Overtone Analyzer Free Edition 1.5.2*^[6].



Gambar 6.1. Tampilan awal rekaman video mobil sebagai sumber bunyi bergerak

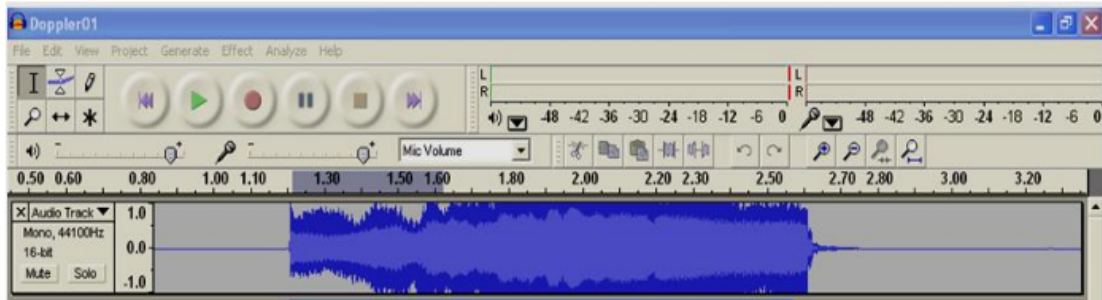


Gambar 6.2. Perangkat keras eksperimen dengan software Tracker, Audacity, dan Overtone Analyzer

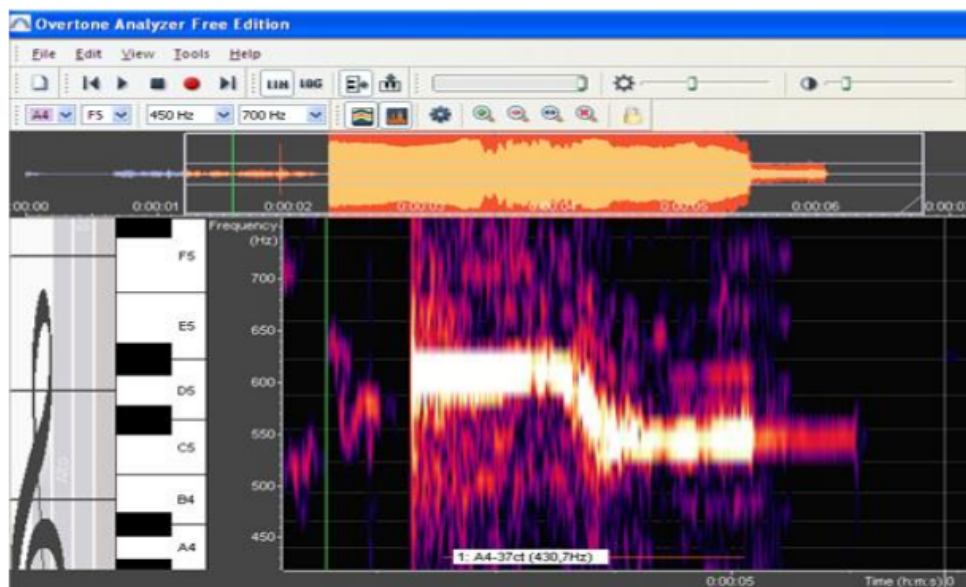
2. Eksperimental

- 1) Langkah eksperimen diawali dengan menjalankan file rekaman video Efek Doppler, kemudian bunyi klakson mobil yang diperkuat oleh *speaker active* direkam dengan *software* Audacity dengan hasil sebagaimana gambar 6.3.

Perekaman frekuensi bunyi juga dilakukan dengan *software Overtone Analyzer* yang hasilnya sebagaimana gambar 6.4.

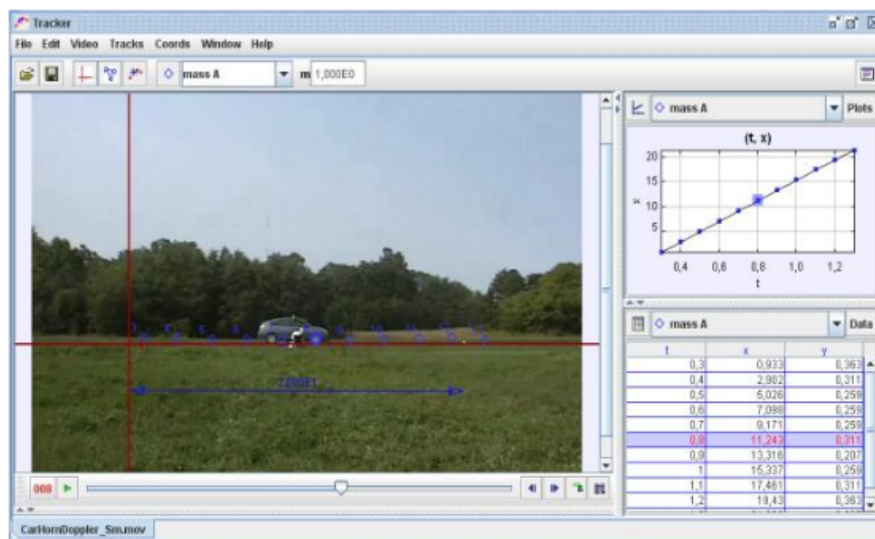


Gambar 6.3. Hasil rekaman bunyi klakson oleh Audacity

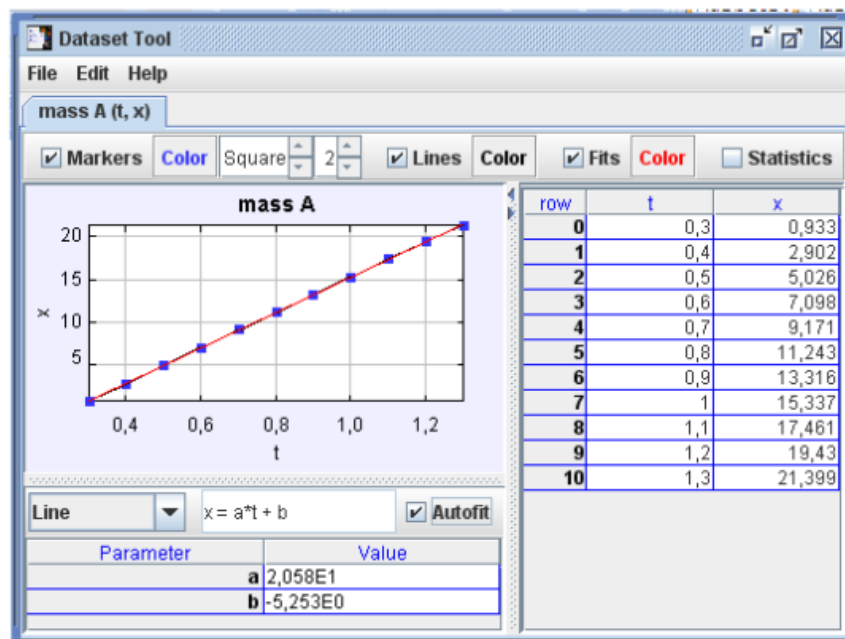


Gambar 6.4. Hasil rekaman bunyi klakson dan tampilan spectrogram oleh *Overtone Analyzer*

- 2) Melakukan analisis video pada file CarHornDoppler.mov dengan software Tracker untuk menentukan kecepatan gerak mobil (sumber bunyi). Hasil yang diperoleh sebagaimana gambar 6.5, dengan penyajian grafik dan tabel data posisi-waktu. Hasil fitting data dengan persamaan garis lurus ditunjukkan pada gambar 6.6.



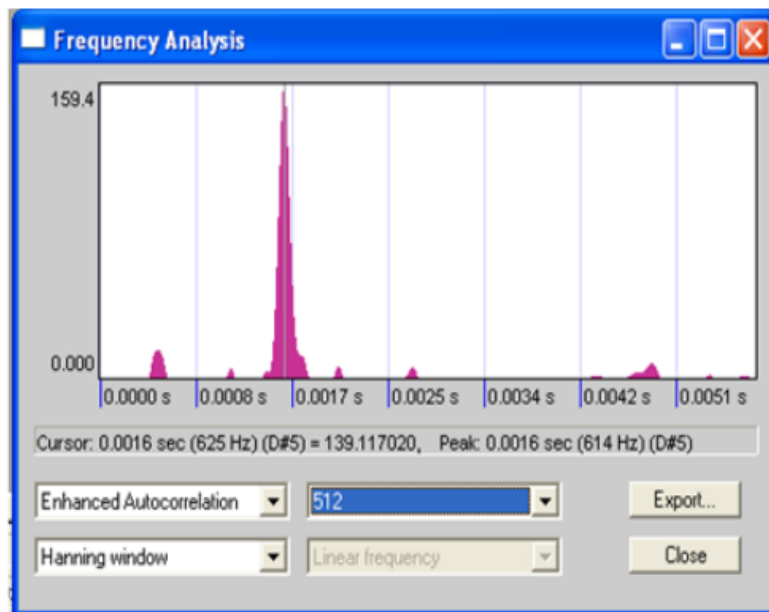
Gambar 6.5. Hasil analisis video oleh Tracker



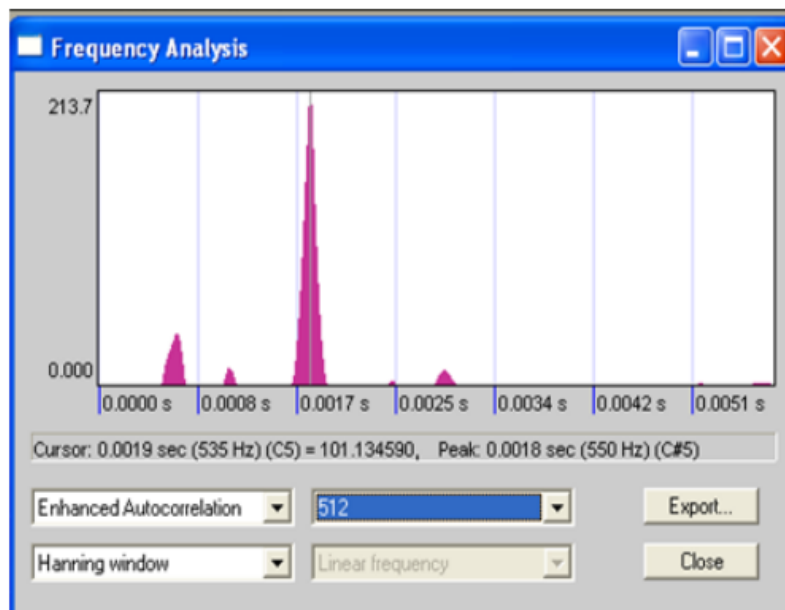
Gambar 6.6. Hasil *fitting* data posisi-waktu dengan persamaan linear oleh Tracker

- 3) Melakukan analisis *Fast Fourier Transform* (FFT) pada hasil rekaman *audio* klakson ketika mobil mendekati pendengar melalui menu *Analyze* submenu *Plot Spectrum* sehingga diperoleh hasil sebagaimana gambar 6.7. Hasil analisis yang

sama pada rekaman *audio* klakson ketika mobil menjauhi pendengar sebagaimana gambar 6.8.



Gambar 6.7. Hasil analisis frekuensi oleh Audacity ketika sumber mendekati pendengar



Gambar 6.8. Hasil analisis frekuensi oleh Audacity ketika sumber menjauhi pendengar

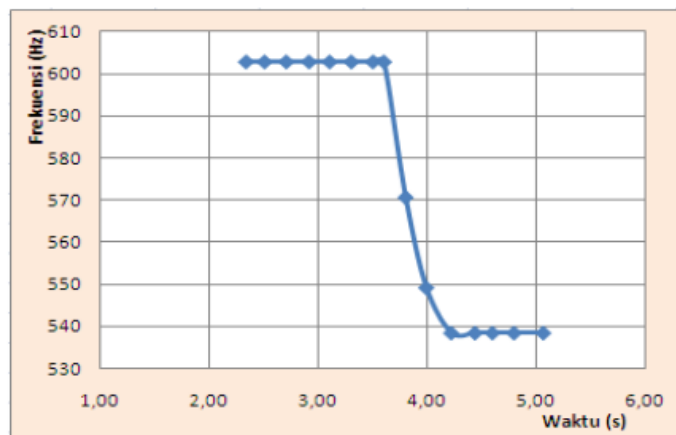
C. Hasil dan Pembahasan

1. Nilai Prediksi Teoritis

Hasil analisis *video* terhadap gerakan sumber bunyi menggunakan perangkat lunak *Tracker* mendapatkan besar kecepatan sumber adalah 20,58 m/s. Kecepatan rambat bunyi pada suhu udara 27,2 °C (ketika perekaman bunyi klakson dilakukan) adalah 347,56 m/s. Sehingga nilai prediksi teoritis $f_F/f_B = 1,126$.

2. Nilai Eksperimental

Hasil analisis spektrum menggunakan *Audacity* memperoleh nilai ukur $f_F = 614$ Hz dan $f_B = 550$ Hz. Sehingga diperoleh nilai eksperimen $f_F/f_B = 1,116$. Sedangkan hasil analisis menggunakan *Overtone Analyzer* diperoleh nilai ukur $f_F = 602,93$ Hz dan $f_B = 538,33$ Hz. Sehingga diperoleh nilai eksperimental $f_F/f_B = 1,120$. Grafik frekuensi bunyi ketika sumber mendekati dan menjauhi pendengar yang diperoleh spektrogram *Overtone Analyzer* disajikan pada gambar 6.9 di bawah ini.



Gambar 6.9. Grafik perubahan frekuensi Doppler terhadap waktu saat mendekati dan menjauhi pendengar

D. Kesimpulan

Pengujian Efek Doppler secara eksperimen dengan sumber bunyi bergerak lurus mudah dan efektif dilakukan dengan perangkat keras dan perangkat lunak multimedia (komputer dan perangkat tambahan *audio-video*). Hasil eksperimental memiliki tingkat kesesuaian yang baik dengan prediksi teoritisnya, dengan ralat relatif sebesar 0,85 %. Secara visual dan numerik, gejala pergeseran frekuensi Doppler mudah teramati pada spektrogram bunyi yang dihasilkan.

E. Pustaka

- [1] H. D. Young dan R. A. Freedman, Fisika Universitas, edisi 10, jilid 2, Jakarta: Erlangga, 2004.
- [2] M. Sasono dan Ishafit, "Simulasi Matlab GUI Pengukuran Perubahan Frekuensi Doppler Ultrasonik pada Obyek Bergerak", Makalah Semnas Fisika 2003, Semarang: UNES.
- [3] The LivePhoto Physics Project, Rochester Institute of Technology, 2008, tersedia di <http://livephoto.rit.edu/>
- [4] D. Brown, Tracker 1.7.2., The Open Source Physics Project, 2007, tersedia di <http://www.opensourcephysics.org/index.cfm>
- [5] Audacity 1.2.6. a Free Digital Audio Editor Software, tersedia di: <http://audacity.sourceforge.net/>
- [6] Overtone Analyzer Free Edition Version 1.5.2.2900, 29. July 2010, Sygyt Software, tersedia di: www.sygyt.com

PENENTUAN KONSTANTA PLANCK MENGUNAKAN LED BERBASIS *MICROCOMPUTER BASED LABORATORY*

Ishafit, Rizki Agung

Intisari - Telah dilakukan penelitian penentuan konstanta Planck menggunakan LED dengan berbasis microcomputer based laboratory. LED digunakan dalam percobaan ini karena LED dapat memancarkan foton, sehingga energi foton (E) yang dipancarkan dari LED berhubungan dengan energi yang diperlukan untuk melompati energi gap (sela energi, E_g) bahan semikonduktor yang bersangkutan. Percobaan dilakukan dengan cara memantau kurva pengosongan kapasitor (C) melalui LED secara seri dengan resistor (R). Bentuk kurva ini akan ditampilkan dengan program software Logger Pro 3.8.4. Analisis terhadap kurva ini menggunakan curve fit dengan persamaan natural exponent, diperoleh nilai tegangan minimum (V_0) untuk menyalakan LED. Hasil energi foton (E) pada tiap LED akan dihubungkan dengan $1/\lambda$ dengan menggunakan persamaan garis lurus, analisis kurva ini bertujuan untuk mencari nilai gradien yang akan digunakan untuk mencari nilai konstanta Planck pada percobaan ini. Hasil percobaan ini menunjukkan bahwa nilai konstanta

Planck yang diperoleh yaitu 6.671×10^{-34} J.s, hasil tersebut hampir mendekati nilai secara teoritisnya yaitu 6.626×10^{-34} J.s dengan tingkat kesalahan 0.679 %.

Abstrack – Has been conduct research of Planck's constant determination using LED-based microcomputer based laboratory. LED's used in these experiments because the LEDs can emit a photon, so that the photon energy (E) emitted from the LED associated with the energy needed to jump the energy gap (between the energy, E_g) semiconductor material in question. The experiments were performed by monitoring the discharge curve of a capacitor (C) through the LED in series with a resistor (R). Form of this curve will be displayed with the software LoggerPro 3.8.4. Toward analysis of these curves using a curve fit to the natural exponent equation, obtained the minimum voltage (V_0) to power the LED. The results of the photon energy (E) on each LED to be connected by $1/\lambda$ by using the equation of a straight line, curve analysis aims to find the value of the gradient that will be used to find the value of Planck's constant in this experiment. The results of these experiments show that the obtained value of Planck's constant is $6,671 \times 10^{-34}$ J.s, the results are close to the theoretical value is $6,626 \times 10^{-34}$ J.s with 0,679 % error rate.

A. Pendahuluan

Konstanta Planck merupakan suatu konstanta yang sifatnya fundamental alam yang berkaitan erat dengan konsep kuantum dalam fisika modern^[1]. Misalnya di dalam ilmu fisika modern, nilai konstanta Planck banyak diterapkan, salah satunya untuk mencari nilai panjang gelombang Compton. Konstanta Planck dilambangkan dengan huruf h , dimana konstanta tersebut digunakan untuk menjelaskan ukuran kuantum.

Dalam pembelajaran fisika baik ditingkat SMA/SMK, masih belum ada penyajian praktikum atau eksperimen dalam membuktikan nilai konstanta Planck. Peserta didik hanya diajarkan besar suatu nilai dari konstanta Planck. Maka dari itu peneliti

melakukan sebuah eksperimen untuk memberikan alternatif yang dapat digunakan sebagai alat percobaan menentukan nilai konstanta Planck yang sebelumnya sudah diketahui sebesar 6.6261×10^{-34} J.s.

Percobaan yang telah dilakukan oleh Stephen Ducharme^[2] adalah “Measuring Planck’s Constant With LEDs” dan hasilnya 5.76×10^{-34} J.s. Wayne P. Garver^[3] dengan judul “The Photoelectric Effect Using LEDs as Light Sources” dan hasilnya $6.19 \pm 0.44 \times 10^{-34}$ J.s. Feng Zhou^[4] berjudul “Computer-Based Experiment for Determining Planck’s Constant Using LEDs” dan hasilnya $6,625 \times 10^{-34}$ J.s. Kevin Range^[5] adalah “Measuring Planck’s constant with LEDs” dan hasilnya $(2.29 \times 10^{-33} \pm 3.3 \times 10^{-34})$ J.s. Kemudian penelitian serupa juga dilakukan oleh Dedy Hamdani^[6] dengan judul penelitian “metode sederhana untuk menentukan rasio konstanta Planck terhadap muatan listrik menggunakan kurva karakteristik Light Emitting Diode (LED)” dan hasilnya adalah 6.08×10^{-34} J.s dengan rasio konstanta Planck terhadap muatan listrik (h/e) sama dengan 3.8×10^{-15} J.s/C.

Penelitian yang berjudul “Penentuan Konstanta Planck Menggunakan LED Berbasis Microcomputer Based Laboratory” memiliki perbedaan dengan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Feng Zhou^[5]. Perbedaan tersebut terletak pada panjang gelombang LED dicari menggunakan spektrometer serta analisis grafik menggunakan persamaan linier antara hubungan energi (E) dengan $1/\lambda$, yang akan digunakan untuk menghitung nilai konstanta Planck serta nilai kapasitor dan resistor yang berbeda.

B. Landasan Teori

1. Energi Foton

Dalam postulatnya Planck mengkuantisasikan energi yang dapat dimiliki osilator, tetapi tetap memandang radiasi termal dalam rongga sebagai gejala gelombang. Einstein menggambarkan bahwa apabila suatu osilator dengan energi pindah ke suatu keadaan dengan energi, maka osilator tersebut memancarkan suatu gumpalan

energi elektromagnetik dengan energi. Einstein menganggap bahwa gumpalan energi yang semacam itu yang kemudian dikenal dengan *foton*^[7].

Foton adalah partikel elementer dalam fenomena elektromagnetik. Biasanya foton dianggap sebagai pembawa radiasi elektromagnetik, seperti cahaya, gelombang radio, dan Sinar-X serta dalam ruang vakum foton selalu bergerak dengan kecepatan cahaya yang besarnya adalah c (2.998×10^8 m/s).

Energi yang dipancarkan sesuai dengan kuanta yang berpautan dengan frekuensi tertentu f dari cahaya, semuanya harus berenergi sama dan bahwa energi ini E berbanding lurus dengan f ^[1]. Besarnya energi yang dipancarkan oleh foton memiliki kaitan dengan cahaya yaitu panjang gelombangnya. Sehingga memiliki persamaan seperti pada persamaan (7.1) yaitu:

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad (7.1)$$

2. Konstanta Planck

Dalam ilmu fisika, banyak sekali penggunaan besaran h (konstanta Planck) untuk mencari suatu besaran yang ada kaitannya dengan besaran tersebut, misalnya saja dalam fisika modern untuk mencari nilai panjang gelombang Compton.

Konstanta Planck mempunyai arti penting lebih daripada sekedar untuk menerangkan suatu percobaan. Dewasa ini, tetapan Planck dipandang sebagai salah satu tetapan alam dan telah diukur dengan ketelitian yang sangat tinggi dalam berbagai percobaan^[8].

Nilai konstanta Planck sendiri pertama kali dikemukakan oleh Max Planck dari hasil eksperimen yang dilakukannya. Nilai konstantanya adalah 6.6261×10^{-34} J.s, dengan lambang besarannya h . Nilai tersebut bisa dicari dengan menggunakan hubungannya dengan energi foton yang dipancarkan atau diserap

3. *Light Emitting Diode (LED)*

Light emitting diode (dioda pemancar cahaya), yang lebih dikenal dengan kependekannya yaitu LED, menghasilkan cahaya ketika arus mengalir melewatinya^[9].

Dioda cahaya atau lebih dikenal dengan sebutan LED (*light emitting diode*) adalah suatu semikonduktor yang memancarkan cahaya monokromatik yang tidak koheren ketika diberi tegangan maju. Gejala ini termasuk bentuk elektroluminesensi. Warna yang dihasilkan bergantung pada bahan semikonduktor yang dipakai, dan bisa juga ultraviolet dekat atau inframerah dekat.

Penggunaan LED sebagai objek untuk penentuan nilai konstanta Planck telah banyak dilakukan dengan berbagai metode yang digunakan. LED digunakan karena dapat memancarkan atau melepaskan energi foton serta dapat memancarkan cahaya yang akibat dari elektronnya memperoleh energi yang cukup untuk melompati energi gap (sela energi, E_g) bahan semikonduktor yang bersangkutan.

LED dipasang secara seri dengan resistor dan kapasitor yang dihubungkan dengan sumber tegangan DC. Kapasitor yang dihubungkan dengan sumber tegangan DC akan menampung muatan yang selanjutnya digunakan untuk menyalakan LED. Tegangan yang dihasilkan adalah tegangan minimum (V_0) untuk menyalakan LED, sehingga akan memancarkan foton yang besarnya seperti pada persamaan (7.1). Kaitannya energi foton dengan tegangan minimum ditunjukkan persamaan (7.2)

$$E = hV_0 = h\frac{c}{\lambda} \quad (7.2)$$

dengan e merupakan muatan pada elektron sebesar $e = 1.6022 \times 10^{-19}$ C dan V_0 adalah tegangan minimum untuk menyalakan LED.

Pada persamaan (7.1) dapat dituliskan ke dalam bentuk persamaan linier yaitu:

$$y = ax + b \quad (7.3)$$

Dari bentuk persamaan (3) dapat diperoleh $y = E$, $a = h/c$ dan $x = 1/\lambda$.

Untuk mencari nilai tegangan minimum (V_0), dapat diperoleh dari *curve fit* terhadap kurva pengosongan kapasitor dengan persamaan *natural exponent* yaitu:

$$V = Ae^{-Ct} + B \quad (7.4)$$

Dengan hasil *curve fit* maka akan diperoleh besarnya tegangan minimum (V_0) dari persamaan (7.4) yang ditunjukkan dari tampilan nilai B .

Nilai B yang diperoleh sebagai tegangan minimum untuk menyalakan LED berdasarkan dari persamaan pada proses pengosongan kapasitor yaitu:

$$V_s = V_c + V_e e^{-\frac{t}{RC}} \quad (7.5)$$

Sebagai menentukan nilai konstanta Planck maka digunakanlah nilai gradien dari garis linier yaitu a dari hasil persamaan (7.3). Nilai a akan digunakan untuk mencari nilai konstanta Planck karena memiliki hubungan yaitu

$$a = \frac{h}{c} \quad (7.6)$$

dengan h merupakan nilai konstanta Planck dan c merupakan kecepatan cahaya sebesar $c = 2.998 \times 10^8$ m/s.

Nilai konstanta Planck hasil percobaan ini akan dibandingkan dengan nilai teoritisnya. Ralat kesalahan nilai hasil percobaan terhadap nilai teoritisnya (ralat relatif) ditentukan dengan menggunakan persamaan

$$\sigma = \left| \frac{h_{\text{percobaan}} - h_{\text{teoritis}}}{h_{\text{teoritis}}} \right| \times 100\% \quad (7.7)$$

C. Metode Penelitian/Eksperimen

1. Alat Penelitian

- a) Spectrometer (alat ukur panjang gelombang LED)
- b) *Bread board* dengan model WB-102.
- c) Kabel penghubung, digunakan untuk penghubung kapasitor dengan resistor, kapasitor dengan LED, serta baterai dengan kapasitor.
- d) Program software Logger Pro 3.8.4.

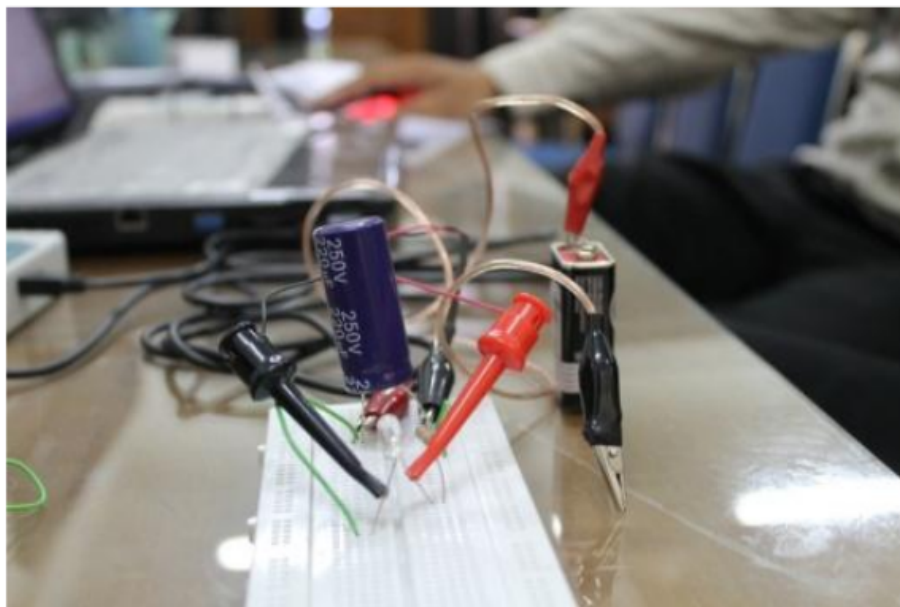
- e) Vernier LabPro, berfungsi untuk menghubungkan Voltage Probe dengan USB laptop agar program Logger Pro 3.8.4 dapat menampilkan data dari pengukuran tegangan minimum untuk menyalakan LED.
- f) Voltage Probe, alat tersebut digunakan untuk penghubung Vernier LabPro dengan kaki kapasitor.
- g) 1 perangkat Laptop, dengan merk Lenovo G450 dengan sistem operasi windows xp professional.

2. Bahan Penelitian

- a) 1 buah Baterai 9 Volt
- b) Kapasitor 220 μ F
- c) Resistor dengan nilai hambatan 12 K Ω .
- d) LED (merah, hijau, biru dan kuning).

3. Rangkaian Penelitian

- a) Alat dan bahan penelitian yang digunakan akan dirangkai seperti pada gambar (7.1).



Gambar 7.1. Rangkaian penelitian

4. Metode Analisis

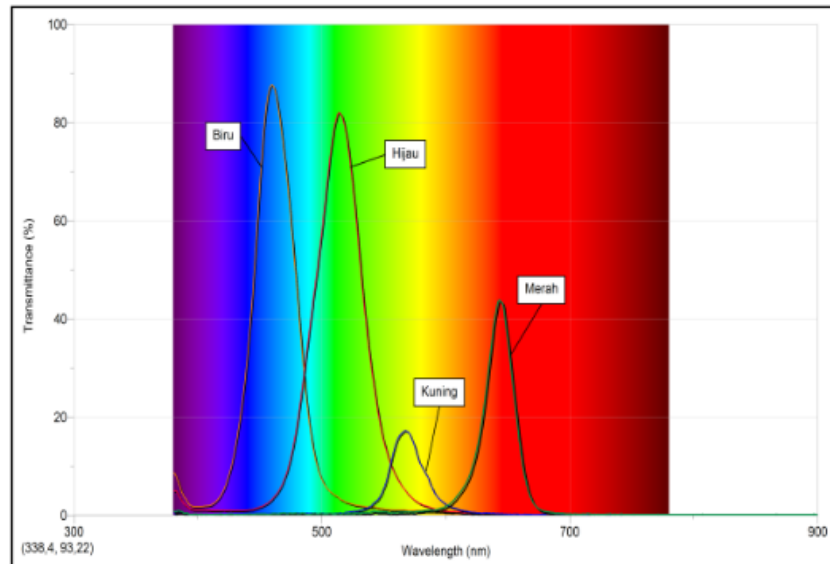
Bentuk kurva pengosongan kapasitor yang tampil pada program *LoggerPro* dianalisis menggunakan persamaan *natural exponent* seperti pada persamaan (7.4), maka diperoleh nilai B sebagai tegangan minimum (V_0). Nilai V_0 akan dikalikan dengan nilai elektron (e) untuk mencari besar energi foton yang dipancarkan oleh LED saat menyala.

Gradien garis (a) akan dicari melalui analisis persamaan garis lurus melalui hubungan energi (E) dengan 1 per panjang gelombang ($1/\lambda$). Hal tersebut dapat dilihat dari bentuk persamaan (7.1) yang dapat dibentuk ke dalam persamaan (7.3).

Dari hasil gradien garis yang menampilkan nilai a maka dapat ditentukan nilai konstanta Planck menggunakan persamaan (7.6).

D. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengukuran panjang gelombang dari keempat warna LED (biru, hijau, kuning dan merah) menggunakan *spectrometer* yang ditunjukkan pada gambar 7.2.



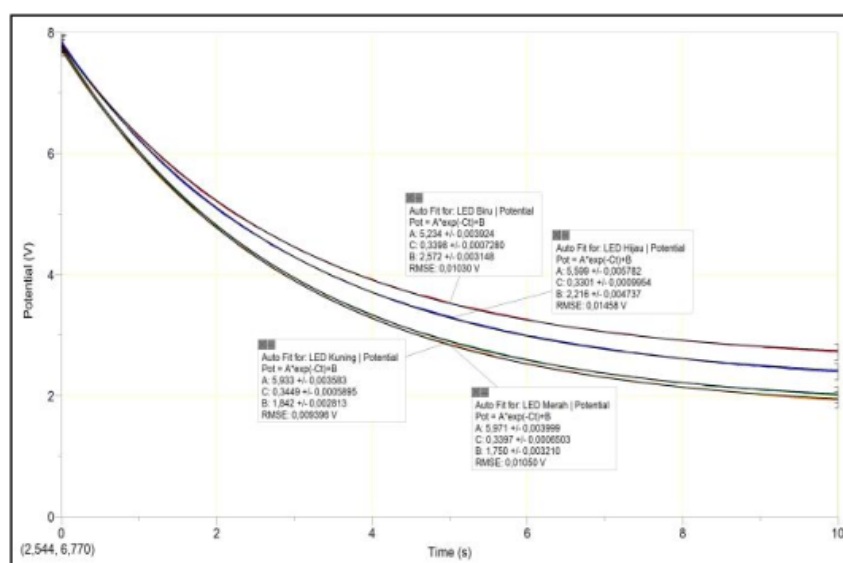
Gambar 7.2. Pengukuran panjang gelombang LED menggunakan spectrometer.

Sedangkan hasil datanya ditunjukkan pada tabel 7.1.

Tabel 7.1. Hasil pengukuran panjang gelombang LED menggunakan spectrometer

LED	λ (nm)	λ (m)
Biru	459,2	4,592E-07
Hijau	514,2	5,142E-07
Kuning	567,4	5,674E-07
Merah	642,9	6,429E-07

Berikut tampilan kurva pengosongan kapasitor untuk setiap LED yang digunakan ditunjukkan pada gambar 7.3.



Gambar 7.3. Bentuk kurva pengosongan kapasitor untuk setiap LED yang digunakan

Dari hasil *curve fit* bentuk kurva untuk pengosongan kapasitor pada setiap LED yang digunakan, maka diperoleh nilai B dan besar energi foton (E) dari masing-masing LED yang ditunjukkan pada tabel 7.2.

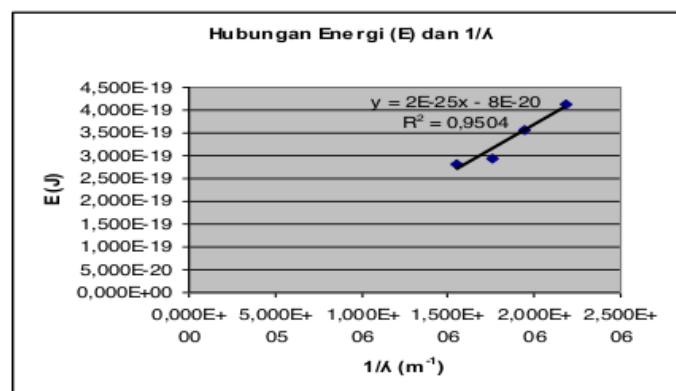
Tabel 7.2. Nilai $1/\lambda$, V_0 dan E masing-masing LED

LED	$1/\lambda$ (m ⁻¹)	$B=V_0$ (Volt)	$E=eV_0$ (J)
Biru	2,178E+06	2,572	4,121E-19
Hijau	1,945E+06	2,216	3,551E-19
Kuning	1,762E+06	1,842	2,951E-19
Merah	1,555E+06	1,75	2,804E-19

Dari tabel 7.2, bahwa besarnya tegangan minimum untuk menyalakan setiap LED memiliki nilai yang berbeda-beda walaupun tegangan yang diberikan nilainya sama. Hal tersebut sesuai dengan hubungan antara V_0 dengan $1/\lambda$ yang ditunjukkan persamaan (7.2) dimana jika panjang gelombang warna LEDnya semakin besar maka tegangan minimum untuk menyalakan LED tersebut akan semakin kecil, begitu juga dengan sebaliknya.

Energi yang dipancarkan oleh masing-masing LED pada tabel 7.2 juga memiliki nilai yang berbeda, semakin besar panjang gelombangnya maka nilai energinya akan semakin kecil nilainya dan hal ini sesuai dengan terjemahan dari persamaan (7.1).

Hasil dari besarnya energi (E) masing-masing LED serta hubungannya dengan $1/\lambda$ akan dianalisis menggunakan persamaan garis linier sesuai dengan persamaan (7.3) yaitu:



Gambar 7.4. Grafik hubungan energi (E) dan $1/\lambda$

Dari data pada gambar 7.4 menunjukkan bahwa nilai gradien garis (a) diperoleh sebesar 2×10^{-25} . Nilai a akan digunakan untuk mencari nilai konstanta Planck dengan menggunakan persamaan (7.6), maka nilai konstanta yang diperoleh sebesar $6,671 \times 10^{-34}$ J.s.

Karena secara teoritis nilai konstanta Planck adalah 6.626×10^{-34} J.s, maka konstanta Planck hasil percobaan masih memiliki ralat. Besarnya ralat nilai hasil percobaan terhadap nilai baku (ralat relatif) adalah

$$\sigma = \left| \frac{6.671 \times 10^{-34} - 6.626 \times 10^{-34}}{6.626 \times 10^{-34}} \right| \times 100\% = 0.679\%$$

E. Kesimpulan

Dari percobaan yang telah dilakukan oleh penulis yaitu penentuan nilai konstanta Planck menggunakan LED dengan berbasis microcomputer based laboratory, diperoleh besar nilai konstanta Planck sebesar 6.671×10^{-34} J.s. nilai tersebut hampir mendekati nilai konstanta Planck secara teoritis yang ditemukan oleh Max Planck yaitu sebesar 6.626×10^{-34} J.s dengan tingkat kesalahan 0.679 %.

Dari hasil penelitian ini juga dapat dijadikan sebagai bahan praktikum atau percobaan untuk membuktikan nilai konstanta Planck baik ditingkat sekolah maupun tingkat perguruan tinggi sebagai menambah wawasan untuk berpikir ilmiah dan cakrawala pengetahuan fisika.

Untuk penelitian selanjutnya yaitu dapat digunakan warna LED lainnya serta dapat menggunakan metode lain dalam mencari tegangan minimum (V_0).

F. Pustaka

- [1] A. Beiser, Concepts Of Modern Physics, Fourth Edition, Alih bahasa The Houw Liong, Konsep Fisika Modern Edisi Keempat, Erlangga, 1990.
- [2] S. Ducharme, Measuring Planck's Constant With LEDs, 1999, Department of Physics and Astronomy Center for Materials Research and Analysis University of Nebraska, Lincoln.
- [3] Website: <http://physics.unl.edu/directory/ducharme/ducharme.html>. Diakses tanggal 10 Juli 2011.
- [4] W. P. Garver, The photoelectric effect using LEDs as light source, The Physics Teacher, Vol 44, 2006, pp. 272–275.
- [5] F. Zhou, and C. Todd, Computer-Based Experiment for Determining Planck's Constant Using LEDs, The Physics Teacher. Vol 46, 2008, pp. 413-415.
- [6] K. Range, Measuring Planck's constant with LEDs, . 2007, CHEM32: Physical Chemistry II.
- [7] D. Hamdani, Metode Sederhana Untuk Menentukan Rasio Konstanta Planck Terhadap Muatan Listrik Menggunakan Kurva Karakteristik Light Emitting Diode (LED), 2007, Perpustakaan Digital ITB.
- [8] Website: <http://digilib.itb.ac.id/gdl.php?mod=browse&op=read&id=jbptitbpp-gdl-dedyhamdan-27444&q=Electronic.html>. Diakses tanggal 10 Juli 2011.

- [9] Y. Wiyatmo, Fisika Modern, Pustaka Pelajar, 2007.
- [10] K. S. Krane, Modern Physics, Alih Bahasa Hans. J. Wospakrik, Fisika Modern, UI-Press, 1992.
- [11] O. Bishop, Electronics-A first course, Alih Bahasa Irzam Harmein, Dasar-dasar Elektronika, Erlangga, 2004.

PENCOCOKAN DATA KE POLINOMIAL PANGKAT DAN LEGENDRE DENGAN MATLAB

Ishafit

Intisari - Penerapan MATLAB pada proses pencocokan data eksperimental fisika ke polinomial pangkat dan polinomial Legendre telah dilakukan. Diperoleh hasil bahwa dengan MATLAB didapatkan kemudahan pada proses pemrograman dan penyajian hasil dalam bentuk grafik. Dengan menggunakan format data berpresisi ganda, maka diperoleh hasil perhitungan berketelitian tinggi. Perhitungan yang teliti dalam pencocokan data sangat diperlukan pada eksperimen konsep dan eksperimen verifikasi dalam pembelajaran fisika di laboratorium, yang tujuannya antara lain adalah pengembangan penguasaan konsep fisika dan kecakapan analisis data.

Abstrack – Application of MATLAB to the experimental physics data matching process to ranked polynomial and Legendre polynomial has been done. The result shows that MATLAB ease us in programming process and presenting the result in a chart. Doubled precision format data was used to gain a high accuracy computed result. High accuracy computing is necessary in data matching for conceptual and verification experiments. It aimed in the development of concept mastery and analytical ability.

A. Pendahuluan

Dua aksioma yang selalu menyertai setiap pengukuran besaran fisis, yaitu; pertama, tidak ada pengukuran yang memberikan hasil tanpa kesalahan (ralat); kedua, hasil pengukuran hampir tidak berarti (bermanfaat) kecuali ralat yang terkait dengan pengukuran itu dinyatakan juga secara eksplisit. Akibat dari aksioma pertama, antara lain data nilai ukur yang diperoleh bukanlah nilai sebenarnya dan kurva yang dibuat melalui titik data ini bukanlah merupakan kurva terbaik untuk besaran fisis terukur. Oleh karenanya, untuk mendapatkan taksiran kurva yang terbaik, yang akan mewakili gejala terukur tersebut, diperlukan proses pencocokan data dengan menggunakan fungsi taksiran terbaik. Akibat aksioma kedua, setiap pengukuran gejala fisis perlu ditulis secara lengkap hasil pengukurannya.

Di dalam pengukuran gejala fisis, fungsi taksiran berupa polinomial pangkat dan polinomial Legendre merupakan fungsi yang sering dipakai untuk pencocokan data. Kemudian, metode pencocokan ke fungsi-fungsi tersebut menggunakan metode kuadrat terkecil (*least square*). Metode ini akan menghasilkan garis/kurva pencocokan yang unik untuk himpunan data yang diberikan.

Implementasi untuk memudahkan proses pencocokan lazimnya dilakukan dengan bantuan komputer dan salah satu bahasa pemrograman yang ada. Dalam hal ini akan dicoba mengimplementasikan dengan MATLAB. Tujuannya adalah untuk mengetahui sejauh mana kasus pencocokan data dapat ditangani dengan baik dan mudah jika dibandingkan dengan menggunakan bahasa pemrograman lain, seperti yang pernah penulis lakukan dengan Turbo Pascal^[1]. Hasil pencocokan data dengan Turbo Pascal diperoleh informasi bahwa nilai hasil perhitungan berketelitian tinggi, namun Turbo Pascal belum menyediakan fungsi pustaka pembuatan grafik yang mampu menyajikan nilai ralat. Untuk kedua ungkapan tersebut diambil contoh permasalahan ialah bagaimana solusi polinomial pangkat untuk data hubungan antara tegangan dengan suhu pada termokopel dan solusi polinomial Legendre untuk data hubungan antara cacah emisi gamma dengan posisi sudut pencacah dapat

ditunjukkan dengan MATLAB. Manfaat dari model ini antara lain dapat digunakan untuk mencari model fungsi polinomial pangkat dan Legendre yang cocok bagi data eksperimental gejala fisis, yang menurut kajian teoritisnya mengikuti kedua fungsi tersebut.

Dalam pembelajaran fisika di laboratorium, pencarian model fungsi dari data ekperimental, yang dikenal dengan istilah pencocokan data, diperlukan pada kegiatan eksperimen konsep dan eksperimen virifikasi, yang mana ketelitian hasil perhitungan sangat diperlukan. Program pencocokan data eksperimental fisika ke polinomial pangkat dan polinomial Legendre dengan MATLAB dapat dimanfaatkan untuk mendukung kegiatan eksperimen tersebut. Selain itu, tujuan pembelajaran fisika di laboratoriu yang salah satunya ialah pengembangan pengetahuan dan keterampilan dasar analisis data eksperimental akan tercapai.

B. Metode Pencocokan Data

Secara umum, fungsi polinomial pangkat dan polinomial legendre dapat dinyatakan melalui persamaan berikut^[2],

$$y(x) = \sum_{l=0}^m a_l f_l(x) \quad (8.1)$$

Untuk polinomial pangkat, fungsi $f_l(x)$ adalah:

$$f_l(x) = x^l \quad (8.2)$$

sedangkan untuk polinomial Legendre, fungsi $f_l(x)$ adalah:

$$P_0(x) = 1, \quad P_1(x) = x, \quad P_2(x) = (3x^2 - 1) / 2 \quad (8.3)$$

yang dalam hal ini $x = \cos \theta$. Suku lebih tinggi dari polinomial Legendre dapat dihitung dari hubungan rekursif sebagai berikut:

$$P_l(x) = \frac{1}{l}[(2l-1)xP_{l-1}(x) - (l-1)P_{l-2}(x)] \quad (8.4)$$

Melalui metode kuadrat terkecil, koefisien polinomial ditentukan dengan meminimalkan kuantitas:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{\sigma_i} \left(y_i - \sum_{l=0}^m a_l f_l(x_i) \right) \right]^2 \quad (8.5)$$

Minimalisasi χ^2 dilakukan dengan mengambil turunan persialnya terhadap koefirian a_l dan menyamakannya dengan nol, sehinggaa diperoleh persamaan:

$$\sum_{i=1}^N y_i \frac{f_l(x_i)}{\sigma_i^2} = \sum_{l=1}^m \left[a_l \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\sigma_i^2} f_k(x_i) f_l(x_i) \right) \right] \quad (8.6)$$

Kemudian, dari persamaan (8.6) dapat disusun dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\beta = \mathbf{a} \alpha \quad (8.7)$$

dalam hal ini:

$$\beta_l = \sum_{i=1}^N \left[y_i \frac{f_l(x_i)}{\sigma_i^2} \right] \quad (8.8)$$

$$\alpha_{kl} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{\sigma_i^2} f_k(x_i) f_l(x_i) \right] \quad (8.9)$$

Sehingga, nilai parameter $\mathbf{a}$ dapat dihitung melalui persamaan:

$$\mathbf{a} = \mathbf{\beta} \mathbf{\alpha}^{-1} \quad (8.10)$$

atau,

$$a_k = \sum_{l=1}^m \left[\varepsilon_{lk} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\sigma_i^2} y_i f_l(x_i) \right) \right] \quad (8.11)$$

dalam hal ini, $\mathbf{\varepsilon} = \mathbf{\alpha}^{-1}$.

Estimasi ralat untuk koefisien $\mathbf{a}$ ditentukan melalui persamaan berikut ini^[3],

$$\sigma_{a_k}^2 = \sum_{i=1}^N \left[\sigma_i^2 \left(\frac{\partial a_j}{\partial y_i} \right)^2 \right] \quad (8.12)$$

$$\sigma_{a_k}^2 = \varepsilon_{kk} \quad (8.13)$$

Jika ralat dari masing-masing titik data tidak diketahui, maka nilai ralat ini dapat didekati oleh persamaan:

$$\sigma_i^2 \approx s^2 = \frac{1}{N-m-1} \sum_{i=1}^N \left[y_i - \sum_{l=1}^m (a_l f_l(x_i)) \right]^2 \quad (8.14)$$

Dengan demikian, estimasi ralat untuk **a** adalah:

$$\sigma_{a_k}^2 \approx s^2 \varepsilon_{kk} (\sigma_i = 1) \quad (8.15)$$

C. Metode Pencocokan Data

Tampilan program komputer yang disusun dengan MATLAB^[4] untuk proses pencocokan data yang telah diuraikan di atas sebagaimana disajikan di bawah ini.

```
% Program Pencocokan Data ke Polinomial Pangkat dan Legendre
% Oleh : Ishafit [Pendidikan Fisika - Universitas Ahmad Dahlan]
% =====
jp=input('Jenis polinomial [ p(ower)/l(egendre) ]= ','s');
m=input('orde polinomial =');
r=input('jenis ralat [s/0/e]= ','s');
% menyusun data masukan
if r=='e',
    x=data(:,1);y=data(:,2);sigma=data(:,3);
else
    x=data(:,1);y=data(:,2);
end
% menghitung bobot dan vektor beta
m=m+1; npts=length(data);
for k=1:m, beta(k)=0;
    for i=1:npts,
        if r=='0',
            w(i)=1; sigma(i)=0;
        elseif r=='s',
            if y(i)==0, sigma(i)=0;w(i)=1;
            else
                absy=abs(y(i));sigma(i)=absy^0.5;w(i)=1/absy;
            end
        end
    end
end
```

```

        end
        else w(i)=1/sigma(i)^2;
    end
    if jp=='p',
        beta(k)=beta(k)+(w(i)*y(i)*x(i)^(k-1));
    else
        beta(k)=beta(k)+(w(i)*y(i)*legpoly(k-1,x(i)));
    end
end
end
% menghitung matriks beta
alpha=zeros(m,m);
for l=1:m,
    for k=1:m, alpha(l,k)=0;
        for i=1:npts,
            if jp=='p',
                alpha(l,k)=alpha(l,k)+(x(i)^(l-1)*
                    x(i)^(k-1)*w(i));
            else
                alpha(l,k)=alpha(l,k)+(legpoly(l-1,x(i))*
                    legpoly(k-1,x(i))*w(i));
            end
        end
    end
end
% menghitung koefisien polinomial
coef=alpha\beta;
% menghitung nilai chisquare
chsq=0;
for i=1:npts, yfit(i)=0;
    for j=1:m,
        if jp=='p',
            yfit(i)=yfit(i)+(coef(j)*x(i)^(j-1));
        else
            yfit(i)=yfit(i)+(coef(j)*legpoly(j-1,x(i)));
        end
    end
    chsq=chsq+w(i)*(y(i)-yfit(i))^2;
end
% menghitung ralat koefisien polinomial
if r=='0',
    sigmaa=(chsq/(npts-m))*(diag(inv(alpha)));
    sigmaa=sigmaa.^0.5;
else
    sigmaa=(diag(inv(alpha))).^0.5;
end
% mencetak hasil
!cls;disp('Coef.   Error ');
disp([coef sigmaa]);disp('Nilai Chisquare ');
disp(chsq/(npts-m+1));
% membuat keluaran grafik
gtl=input('Graph Title : ','s');
xlb=input('X-axis label : ','s');

```

```

ylb=input('Y-axis label : ','s');
for i=1:length(data),
    yup(i)=y(i)+sigma(i); ylo(i)=y(i)-sigma(i);
end;
hold off;
if x(1)>0,
    yfit=[sigmaa(1) yfit]; xfit=[0; x];
else xfit=x;
end;
subplot(211);
plot(xfit,yfit,'-');
ye=[ylo; yup]; xe=[x'; x'];
hold on; plot(xe ,ye,'-',x,y,'+');
title(gtl); xlabel(xlb); ylabel(ylb); clear;
□
function lgpol=legpoly(li,xi);
xi=cos(xi/180*pi);pm=1;pz=xi;
if li==0, pz=1;
elseif li==1, pz=xi;
else
    for ll=1:li-1,
        pp=((2*ll+1)*xi*pz-ll*pm)/(ll+1); pm=pz; pz=pp;
    end
end
lgpol=pz;

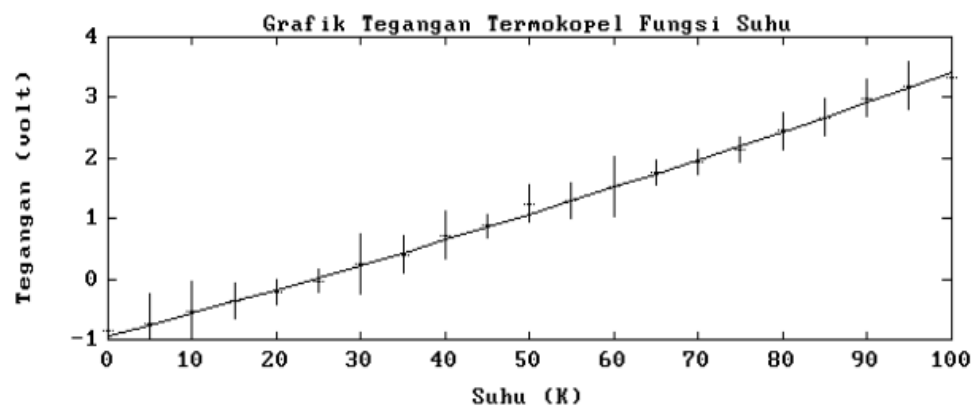
```

D. Hasil Pencocokan Data

Dengan mengambil contoh data hubungan antara tegangan keluaran dari sambungan termokopel V sebagai fungsi suhu T untuk pencocokan ke polinomial pangkat orde 2, seperti pada Lampiran 1^[2], maka diperoleh hasil pencocokan data sebagai berikut:

Tabel 8.1. Nilai Koefisien Polinomial Pangkat Orde 2

Koefisien	Nilai
a_0	$-0,937 \pm 0,220$
a_1	$0,037 \pm 0,010$
a_2	$0,0001 \pm 0,0001$

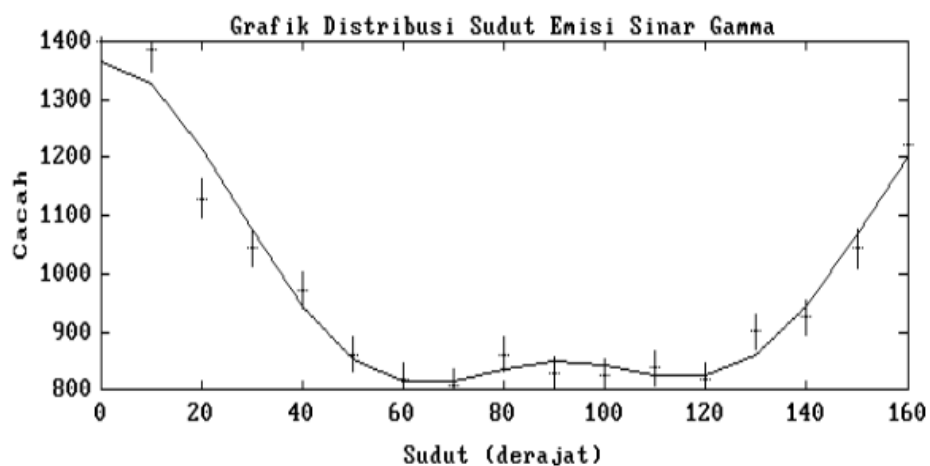


Gambar 8.1. Hasil Pencocokan Data Polinomial Pangkat Orde 2

Pencocokan ke polinomial Legendre orde 4 dilakukan dengan mengambil contoh data hubungan distribusi sudut pancaran sinar gamma, seperti pada Lampiran 2^[2]. Hasil pencocokannya adalah sebagai berikut:

Tabel 8.2. Nilai Koefisien Polinomial Pangkat Orde 2

Koefisien	Nilai
a_0	$906,78 \pm 7,77$
a_1	$-1,02 \pm 12,43$
a_2	$258,53 \pm 16,32$
a_3	$12,00 \pm 19,47$
a_4	$189,52 \pm 21,66$



Gambar 8.2. Hasil Pencocokan Data Polinomial Legendre Orde

E. Kesimpulan

Dari aspek pemrograman, proses pencocokan data dengan menggunakan MATLAB mudah dilakukan. Fungsi pustaka untuk penyajian grafik (fungsi *plot*) mudah dimanipulasi untuk berbagai tampilan keluaran, seperti penyajian ralat yang lazim dimunculkan pada grafik hasil pengukuran. Kecepatan pemrosesan data, khususnya untuk kasus dalam tulisan ini, relatif sama jika dibandingkan dengan menggunakan bahasa pemrograman seperti Turbo Pascal. Oleh karena MATLAB menggunakan data dengan ketelitian ganda, maka dari aspek ketelitian, hasil perhitungannya memiliki ketelitian yang baik.

F. Pustaka

- [1] Ishafit, 1993, Program Komputer Regresi Untuk Analisis Hasil Eksperimen Fisika, Makalah Pertemuan Ilmiah XII HFI Jateng & DIY, UGM, Yogyakarta.
- [2] Bevington, P. R., and Robinson D. K., 1994: Data Reduction And Error Analysis For The Physical Sciences, second edition, McGraw-Hill, New York.
- [3] Bevington, P. R., 1965: Data Reduction And Error Analysis For The Physical Sciences, first edition, McGraw-Hill, New York.
- [4] The Math Work Inc, 1992: The Student Edition of MATLAB For MS-DOS Personal Computers, Prentice Hall, New Jersey.

Lampiran 1. Data Tegangan Termokopel Sebagai Fungsi Suhu

T (K)	V (volt)	T(K)	V(volt)
0	-0.738 0.5	55	1.305 0.3
5	-0.537 0.5	60	1.541 0.5
10	-0.849 0.4	65	1.768 0.2
15	-0.354 0.3	70	1.935 0.2
20	-0.196 0.2	75	2.147 0.2
25	-0.019 0.2	80	2.456 0.3
30	0.262 0.5	85	2.676 0.3
35	0.413 0.3	90	2.994 0.3
40	0.734 0.4	95	3.200 0.4
45	0.882 0.2	100	3.318 0.5
50	1.258 0.3		

Lampiran 2. Data Distribusi Sudut dari Cacah Emisi Gamma

Sudut ($^{\circ}$)	Cacah	Sudut ($^{\circ}$)	Cacah
0	1400	90	829
10	1386	100	824
20	1130	110	839
30	1045	120	819
40	971	130	901
50	862	140	925
60	819	150	1044
70	808	160	1224
80	862		

STUDI KOMPARASI METODE “UNFOLDING” DALAM SPEKTROSKOPI NUKLIR

Ishafit

Intisari - Data spektrum energi radiasi nuklir sangat berperan dalam penentuan data nuklir makroskopis, analisis kandungan unsur, dan pemilihan bahan perisai radiasi (shielding). Penentuan spektrum energi radiasi nuklir melalui pengukuran menghasilkan spektrum yang menyimpang dari spektrum sebenarnya, karena adanya pengaruh resolusi sistem cacah dan fluktuasi statistik pada sumber itu sendiri. Dalam hal ini, proses unfolding diperlukan guna mendapatkan spektrum energi sebenarnya. Penerapan dan komparasi metode “unfolding” inversi matriks, metode iteratif Scofield, dan metode kuadrat terkecil telah dilakukan dalam “unfolding” spektrum dari sistem cacah dengan fungsi resolusi Gaussian dan Non-Gaussian. Untuk fungsi resolusi sistem cacah Gaussian, ketiga metode unfolding tersebut dapat diterapkan, sedangkan untuk Non-Gaussian perlu pengkajian lebih lanjut karena hasilnya beresilasi.

Abstrack – Nuclear radiation energy spectrum data is very useful in determining macroscopic nuclear data, contained element analysis, and determining radiation shielding material. Measurement of nuclear radiation energy spectrum shows spectrum that deviate from the actual spectrum; this was because there are

influences of count system resolution and statistic fluctuation from the radiation source itself. In this case, unfolding process was needed to gain the actual spectrum. Implementation and comparing matrix inversion “unfolding” method, Scofield iterative method, and least square method have been done in unfolding process of count system with Gaussian resolution and Non-Gaussian function. For the Gaussian count system function, those unfolding methods can be applied, nonetheless for Non-Gaussian function needs to be studied in advance due to oscillating result.

A. Pendahuluan

Spektroskopi nuklir adalah metode pengukuran radiasi yang berhubungan dengan penentuan distribusi energi partikel atau foton yang terpancar dari sumber radioaktif atau reaksi nuklir^[1]. Metode unfolding merupakan bagian dalam proses spektroskopi nuklir yang menangani pengolahan data dalam menentukan spektrum energi radiasi nuklir sebenarnya.

Sebagaimana diketahui bahwa proses pengukuran besaran fisika dengan suatu alat ukur tidak menghasilkan besaran fisika secara eksak. Hal tersebut terjadi karena adanya fluktuasi statistik dari besaran fisika yang terukur dan fluktuasi yang timbul dari alat ukur itu sendiri. Pengaruh alat ukur pada proses pengukuran dinyatakan dengan fungsi resolusi atau fungsi respon alat ukur. Pengaruh fungsi respon terhadap besaran fisik sebenarnya dikenal sebagai proses ***folding*** atau konvolusi. Sedangkan penentuan besaran fisika yang sebenarnya dari hasil pengukuran dengan menghilangkan pengaruh alat ukur disebut proses ***unfolding*** atau dekonvolusi^[1].

Berbagai metode unfolding telah dikembangkan, seperti metode derivatif, metode Monte Carlo, metode iteratif, metode transformasi Fourier, metode inversi matriks langsung, dan metode kuadrat terkecil. Metode unfolding yang akan dikaji dan dikomparasikan dalam makalah ini dibatasi tiga jenis metode, yaitu metode inversi matriks langsung, metode iterasi Scofield, dan metode kuadrat terkecil. Ketiga metode ini menghasilkan sistem persamaan simultan yang penyelesaiannya

melibatkan proses inversi matrik koefisien (matriks respon detektor). Besar kecilnya sistem persamaan simultan yang terbentuk tergantung pada pemilihan interval pencuplikan energi. Sebagai akibat dari pengambilan cuplikan energi tersebut setidaknya akan muncul dua permasalahan, yaitu: Pertama: jika pengambilan interval pencuplikan inergi terlalu kecil maka akan menghasilkan matriks koefisien terlalu besar dan persamaan menjadi tidak stabil. Sehingga, penyelesaiannya metode unfolding menjadi sangat sensitif terhadap perubahan-perubahan kecil matriks koefisien (respons). Kedua: apabila fungsi respon kontinu maka pengambilan interval cuplikan energi yang terlalu lebar akan mengurangi ketelitian pada perhitungan unfolding^[3].

B. Kajian Pustaka

1. Metode Unfolding

Dalam spektroskopi, hubungan antara spektrum sumber yang belum diketahui, spektrum terukur, dan respon detektor secara matematis dinyatakan oleh persamaan integral Fredhlom, yaitu :

$$M(E) = \int_0^{\infty} R(E, E') S(E') dE' \quad (9.1)$$

$S(E) dE$ = spektrum sumber = jumlah partikel yang dipancarkan dengan energi antara E dan $E+dE$.

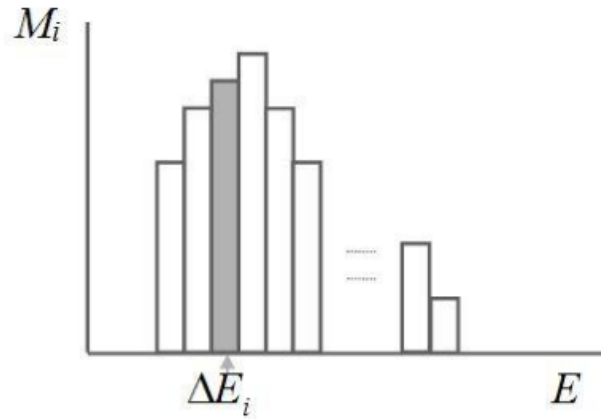
$M(E) dE$ = spektrum terukur = jumlah partikel yang terukur dengan energi antara E dan $E+dE$.

$R(E, E') dE$ = respon detektor = kebolehjadian bahwa partikel yang dipancarkan oleh sumber berenergi E' akan terukur dengan energi antara E dan $E+dE$.

Proses unfolding berarti mencari nilai $S(E)$ jika $M(E)$ dan $R(E, E')$ diketahui. Nilai $M(E)$ yang terukur oleh spektrometer akan berbentuk histogram (Gambar 9.1) dengan nilai ukur M_i , yang terhubungkan dengan persamaan:

$$M_i = \int_{E_i}^{E_{i+1}} M(E) dE \quad (9.2)$$

Apabila $E_{i+1} - E_i = \Delta E$ = lebar saluran energi spektrometer maka $M(E)$ dapat diperoleh dari M_i melalui hubungan $M(E_i) = M_i / \Delta E_i$



Gambar 9.1. Histogram spektrum terukur

Pada umumnya, metode unfolding melakukan transformasi persamaan (9.1) ke dalam persamaan matriks, yaitu:

$$M(E) = \sum_j^{NR} \int_{E_j}^{E_{j+1}} R(E, E') S(E') dE' \quad (9.3)$$

Integral meliputi E' dituliskan sebagai jumlah integral meliputi NR interval energi : $E_{j+1} - E_j = \Delta E_j$. Jika persamaan (9.3) diintegrasikan meliputi E' maka diperoleh persamaan :

$$M_i = \int_{E_i}^{E_{i+1}} M(E) dE = \sum_j^{NR} \int_{E_i}^{E_{i+1}} dE \int_{E_j}^{E_{j+1}} R(E, E') S(E') dE' \quad (9.4)$$

Persamaan (9.4) ini masih dalam bentuk eksak. Untuk proses selanjutnya diperlukan suatu pendekatan untuk spektrum sumber $S(E)$ ^[1].

2. Metode inversi matriks langsung

Apabila spektrum sumber $S(E)$ dalam interval energi ΔE dengan persamaan:

$$S(E') = \frac{S_j}{\Delta E_j} \quad (9.5)$$

dan mendefinisikan:

$$R_{ij} = \frac{1}{\Delta E_j} \int_{E_i} dE \int_{E_j} R(E, E') dE' \quad (9.6)$$

kemudian menyubstitusikan ke dalam persamaan (9.4), maka diperoleh persamaan:

$$M_i = \sum_j R_{ij} S_j ; \quad i, j = 1, 2, \dots, NC \quad (9.7)$$

atau dalam notasi matriks:

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}\mathbf{S} \quad (9.8)$$

Penyelesaian formal dari persamaan (9.8) untuk mendapatkan $\mathbf{S}$ adalah^[1],

$$\mathbf{S} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{M} \quad (9.9)$$

3. Metode Iterasi Scofield

Nilai $\mathbf{S}$ yang diperoleh dari penyelesaian persamaan (9.9) memungkinkan adanya nilai $\mathbf{S}$ yang negatif. Dalam makna fisis, penyelesaian negatif tidak diinginkan. Dengan alasan inilah Scofield mengusulkan penyelesaian dengan mengadakan pembatasan bahwa penyelesaian yang mungkin adalah:

$$S_i \geq 0 ; i=1, 2, \dots, NC \quad (9.10)$$

Dengan pembatasan tersebut (9.10), Scofield mengajukan algoritma iteratif untuk mencari penyelesaian $\mathbf{S}$ sebagai berikut^[4],

- 1) $\mathbf{S}^0 = \mathbf{M}$
- 2) $\mathbf{Y}^m = \mathbf{A}\mathbf{S}^m ; m = 0, 1, 2, \dots$
- 3) menghitung $\mathbf{D}^{(m)}$ dari persamaan :

$$\mathbf{Y}^{(m)} = \mathbf{D}^{(m)} \mathbf{S}^{(m)}, \text{ dengan } \mathbf{D}^{(m)} = \begin{pmatrix} d_{11}^{(m)} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_{22}^{(m)} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & d_{nn}^{(m)} \end{pmatrix} \quad (9.11)$$

4) menghitung $\mathbf{S}^{(m+1)} = [\mathbf{D}^{(m)}]^{-1} \mathbf{M}$

5) mengulangi proses 2) s.d. 4) sehingga dicapai penyelesaian yang konvergen.

4. Metode Kuadrat Terkecil

Dalam unfolding asas kudrat terkecil, $S(E)$ diasumsikan dapat dinyatakan sebagai jumlah dari NS komponen diskrit, yaitu :

$$S(E') = \sum_{j=1}^{NS} X_j \delta(E' - E_j) \quad (9.12)$$

dan didefinisikan pula:

$$A_{ij} = \frac{1}{E_i - E_{j-1}} \int_{E_{i-1}}^{E_i} R(E, E_j) dE \quad (9.13)$$

Dengan menyubstitusikan persamaan (9.12) dan (9.13) ke persamaan (9.4) maka diperoleh bentuk persamaan:

$$M_i = \sum_{j=1}^{NS} A_{ij} X_j ; \quad (i=1, 2, \dots, NR; \quad j=1, 2, \dots, NS) \quad (9.14)$$

Metode asas kuadrat terkecil memulai prosesnya dari persamaan (9.14) dan meminimumkan kuantitas Q yang didefinisikan sebagai berikut:

$$Q = \sum_{i=1}^{NR} w_i (M_i - \sum_{j=1}^{NS} A_{ij} X_j)^2 \quad (9.15)$$

Faktor bobot w_i biasanya diambil dari varians balik M_i . Minimalisasi diperoleh jika:

$$\frac{\partial Q}{\partial X_k} = 0; \quad k=1, \dots, NS \quad (9.16)$$

yang menghasilkan persamaan:

$$\sum_{i=1}^{NR} w_i A_{ik} (M_i - \sum_{j=1}^{NS} A_{ij} X_j) = 0; \quad k=1, \dots, NS \quad (9.17)$$

Dengan demikian, nilai X diperoleh dari penyelesaian persamaan matriks berikut ini^[1]

$$X = (A^T W A)^{-1} A^T W M \quad (9.18)$$

C. Komparasi Metode Unfolding

Oleh karena ketiga metode unfolding yang ditinjau melibatkan proses inversi matriks, maka dipilih metode inversi matriks dengan strategi pivoting, agar diperoleh tingkat ketelitian yang tinggi. Proses komputasinya dilakukan dengan bahasa Turbo Pacal versi 6, dengan tipe data Extended (dengan ketelitian 10 digit). Kode programnya adalah sebagai berikut:

1. Kode Program Metode Inversi Matriks Langsung

```

Procedure InvMat(Var R:Matrik; Var C : Vektor);
Var i,j,k : Integer;
Begin
  (* ----- Menghitung Inversi ----- *)
  Invers(R,Nc);
  (* ----- Menghitung phi ----- *)
  For k:=1 To Nc Do
    Begin
      phi[k]:=0;
      For i:=1 To Nc Do
        phi[k]:=phi[k]+R[k,i]*C[i];
      End;
  (* ----- Mencetak phi ----- *)
  For k:=1 To Nc Do
    Begin
      Writeln('phi(',k,') = ',phi[k]:10:6);
    End;
  End;
End;
```

2. Kode Program Metode Kuadrat Terkecil

```
Procedure LSQ(Var R:Matrik;var W,C: Vektor);
Var i,j,k : Integer;
    Ws,Cs : Vektor;
    Rs     : Matrik;
Begin
    (* ----- Perkalian [W x C] ----- *)
    For i:=1 To nc Do
        W[i]:=1;
    For i:=1 To Nc Do
        ws[i]:=w[i]*c[i];
    (* ----- Perkalian [R(trans) x W x C] ----- *)
    For i:=1 to NC Do
        Begin
            cs[i]:=0;
            For j:=1 to Nc Do
                Begin
                    cs[i]:=cs[i]+R[j,i]*ws[j];
                End;
            End;
        End;

    (* ----- Perkalian [R(trans) x W x R] = Rs ----- *)
    For i:=1 To Nc Do
        For j:=1 To Nc Do
            RS[i,j]:=0;
        For i:=1 To Nc Do
            For j:=1 To Nc Do
                For k:=1 To Nc Do
                    RS[i,j]:=RS[i,j]+R[k,i]*w[i]*R[k,j];
                End;
            End;
        End;
    (* ----- Menghitung Inversi Matriks RS ----- *)
    Invers(Rs,Nc);
    (* ----- Perkalian [R(trans)xWxR] x [R(trans)xWxC] ----- *)
    For i:=1 to NC Do
        Begin
            phi[i]:=0;
            For j:=1 to Nc Do
                phi[i]:=phi[i]+Rs[i,j]*cs[j];
            End;
        End;
    (* ----- Mencetak Hasil Unfolding ----- *)
    For k:=1 To Nc Do
        Begin
            Writeln(E[k]:6:4,' ',C[k]:10:4,' ',phi[k]:10:4);
        End;
    End;
```

3. Kode Program Metode Scofield

```
Procedure Scof(Var R: Matrik;C : Vektor);
Var i,j,Iter : Integer;
    Xm,Ym : Vektor;
    Dm     : Matrik;
Begin
    (* Perkalian w x c *)
    For i:=1 To Nc Do
```

```

    Xm[i]:=c[i];
For Iter:=1 To MaxIter Do
Begin
ClrScr;
For i:=1 to NC Do
Begin
Ym[i]:=0;
For j:=1 to Nc Do
Begin
Ym[i]:=Ym[i]+R[i,j]*Xm[j];
{rite(Ym[i]:8:5,' ');delay(1);}
End;
End;
For i:=1 To Nc Do
For j:=1 To Nc Do
If i=j Then Dm[i,j]:=Ym[i]/Xm[i] Else Dm[i,j]:=0;
Invers (Dm,Nc) ;

For i:=1 to NC Do
Begin
Xm[i]:=0;
For j:=1 to Nc Do
Begin
Xm[i]:=Xm[i]+Dm[i,j]*C[j];
End;
phi[i]:=Xm[i];
Writeln(Iter,' ',E[i]:6:4,' ',phi[i]:8:5,' ');
End;
End;
End;
End;

```

Komparasi dilakukan dengan cara memberikan dua jenis data masukan yang diperoleh dari detektor dengan fungsi respon Gaussian dan non-Gaussian kepada ketiga metode unfolding tersebut di atas. Selain itu, untuk masing-masing jenis data masukan dilakukan perubahan pengambilan lebar interval cuplikan energi atau ukuran sampel cuplikan spektrum.

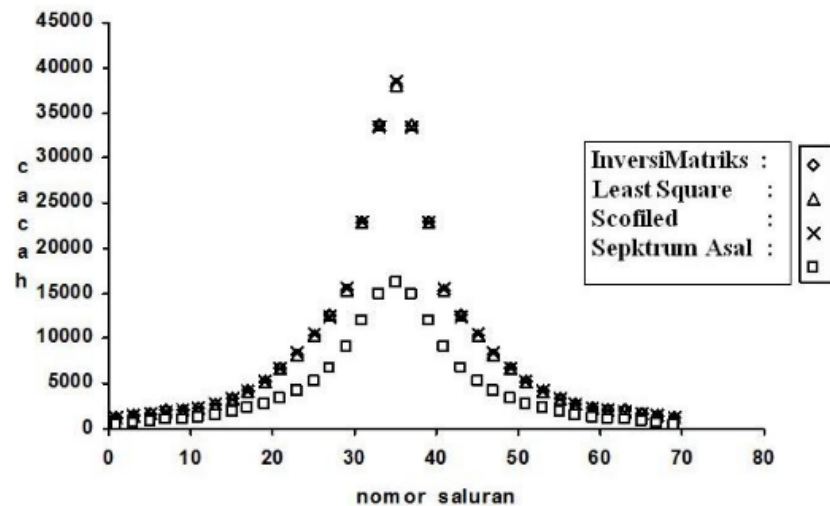
Untuk jenis data pertama (detektor dengan respon Gaussian) diambil simulasi hasil proses folding (konvolusi) spektrum profil Compton sebenarnya yang diukur oleh Dubard dengan sumber ^{137}Cs ^[5] dengan fungsi respon Gaussian^[2]. Proses folding dilakukan melalui persamaan (9.7) dengan fungsi respon :

$$R_{ij} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-0.5\left(\frac{i-j}{\sigma}\right)^2} \quad (9.19)$$

Sedangkan untuk jenis data kedua (detektor dengan respon no-Gaussian) diambil dari data spektrum gamma dengan sumber PuBe hasil pengukuran dengan detektor sintilasi organik cair type NE-213.

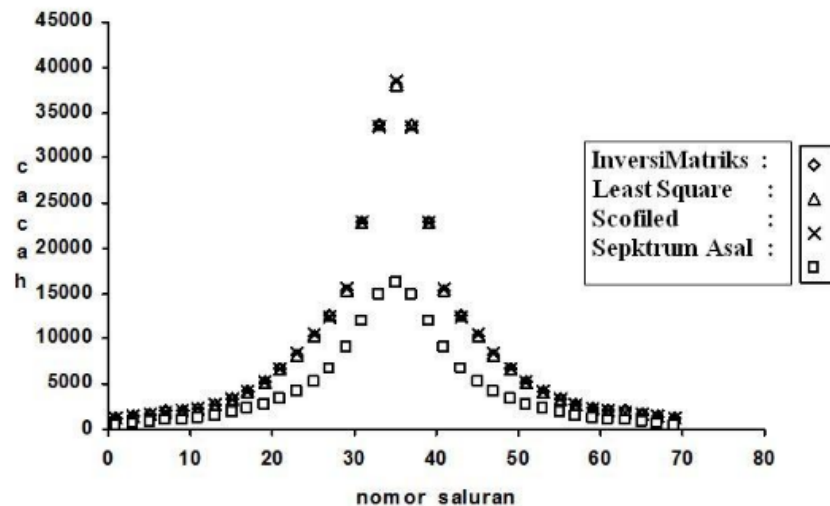
D. Hasil dan Kesimpulan

1. Hasil Unfolding untuk Respon Detektor berbentuk Gaussian



Gambar 9.2. Grafik unfolding untuk cacah tiap dua saluran

2. Hasil Unfolding untuk Respon Detektor berbentuk Non-Gaussian



Gambar 9.3. Grafik unfolding untuk cacah tiap dua saluran

3. Kesimpulan

Untuk fungsi resolusi Gaussian dapat disimpulkan sebagai berikut:

- a) Metode unfolding Inversi Matriks dan Kuadrat Terkecil cukup baik diterapkan untuk data cacah dengan interval berjauhan atau untuk elemen fungsi resolusi berjauhan.
- b) Metode unfolding Iteratif Scofield dapat diterapkan untuk data cacah atau elemen fungsi resolusi berdekatan maupun berjauhan.

Sedangkan untuk fungsi resolusi Non-Gaussian, hasil penyelesaian ketiga metode unfolding (Inversi Matriks, Kuadrat Terkecil, dan Iteratif Scofield) menunjukkan pola penyelesaian yang beresilasi, sehingga perlu kajian lebih lanjut untuk menerapkan metode-metode ini.

E. Pustaka

- [1] Tsoulfanidis, N., 1983 : Measurement and Detection of Radiation, Hemisphere Publishing Co., New York.
- [2] Mutiara S., Pramudinta A., dan Hartoyo S., 1989, Dekonvolusi Dengan Metode Transformasi Fourier, Prosiding Simposium Fisika Nasional XII Himpunan Fisika Indonesia, 491-496.
- [3] Burrus. W.R., and Verbinski, V.V., 1969, Fast-Neutron Spectroscopy With Thick Organic Scintillator, Nuclear Instruments and Methods, 67:181-196.
- [4] Su, Y. S., 1967, Study Of Scintillation Spectrometry : Unfolding Methods, Nuclear Instrumen and Methods, 54:109-115.
- [5] Johnson, R.H., Ingersoll, D.T., Wehring, B.W., and Dorning, J.J., 1977, NE-213 Neutron Spectrometry System For Measurements From 1.0 To 20 MeV, Nuclear Instruments and Methods, 145:337-346.

Tabel 9.1 Hasil Metode Unfolding Inversi Matriks, Kuadrat Terkecil, dan Iteratif Scofield

Saluran	Met. Inv. Mat.	Met. LSQ	Met. Scof. (It.=5)	Met. Scof.(It.=10)	Met. Scof.(It.=20)
1	1199.76	1199.76	1159.80	1185.12	1198.36
3	1499.70	1499.70	1515.66	1504.73	1496.21
5	1699.66	1699.66	1739.91	1721.89	1712.56
7	1999.60	1999.60	1969.83	1976.67	1984.58

Saluran	Met. Inv. Mat.	Met. LSQ	Met. Scof. (It.=5)	Met. Scof.(It.=10)	Met. Scof.(It.=20)
9	2199.56	2199.56	2186.70	2198.85	2204.59
11	2399.52	2399.52	2416.56	2411.32	2408.48
13	2799.44	2799.44	2797.18	2787.35	2783.56
15	3399.32	3399.32	3413.84	3421.53	3413.04
17	4299.13	4299.14	4253.73	4278.08	4280.17
19	5298.93	5298.93	5318.54	5314.07	5347.82
21	6698.65	6698.66	6704.07	6629.02	6627.83
23	8298.33	8298.33	8438.51	8394.26	8307.59
25	10297.93	10297.93	10239.12	10403.91	10432.47
27	12597.46	12597.46	12104.15	12252.79	12377.80
29	15396.91	15396.91	15765.03	15575.80	15513.69
31	22895.38	22895.38	23411.70	23119.95	23011.56
33	33693.23	33693.23	33264.74	33338.45	33379.93
35	38092.32	38092.32	38078.63	38409.54	38476.23
37	33693.23	33693.23	33624.75	33338.46	33379.95
39	22895.38	22895.38	23411.70	23119.94	23011.54
41	15396.91	15396.91	15765.03	15575.80	15513.70
43	12597.46	12597.46	12104.15	12252.79	12377.80
45	10297.93	10297.93	10239.12	10403.90	10432.47
47	8298.33	8298.33	8438.51	8394.26	8307.58
49	6698.65	6698.66	6704.07	6629.01	6627.83
51	5298.93	5298.93	5318.55	5314.07	5347.83
53	4299.13	4299.14	4253.73	4278.08	4280.16
55	3399.32	3399.31	3413.84	3421.53	3413.04
57	2799.44	2799.44	2797.18	2787.35	2783.56
59	2399.52	2399.51	2416.56	2411.32	2408.48
61	2199.56	2199.56	2186.69	2198.85	2204.59
63	1999.60	1999.60	1969.83	1976.67	1984.60
65	1699.66	1699.66	1739.91	1721.89	1712.56
67	1499.70	1499.70	1515.66	1504.73	1496.21
69	1199.76	1199.76	1159.79	1185.12	1198.36

PROGRAM KOMPUTER SLOP UNTUK UNFOLDING SPEKTRUM ENERGI NEUTRON

Ishafit

Intisari - Program komputer unfolding metode SLOP untuk keperluan spektroskopi neutron cepat berbasis sintilator organik, yang dapat dijalankan dengan komputer IBM-PC/AT atau sejenisnya, telah dibuat dengan bahasa pemrograman Turbo Pascal versi 6.0. Program komputer unfolding ini telah diuji coba pada data spektrum energi neutron PuBe yang diperoleh dari pengukuran dengan sintilator organik cair NE-213. Hasil unfolding menunjukkan kesesuaian dengan spektrum energi yang diperoleh dari pengukuran dengan metode TOF.

Abstrack – An unfolding computer code using the SLOP method for fast neutron spectroscopic based on the organic scintillator which is executable on IBM-PC/AT computer or its compatible, has been made using Turbo Pascal programming language of the 6.0 version. This unfolding computer code has been tested by means of neutron energy spectrum data of PuBe obtained from the measurements with NE-213 liquid organic scintillator. The results show a good egreement with the energy spectrum obtained from the TOF methods.

A. Pendahuluan

Melalui kegiatan spektroskopi, usaha pengukuran spektrum energi neutron dengan menerapkan berbagai metode deteksi telah banyak dilakukan. Salah satu metode yang secara luas telah digunakan ialah metode pentalan proton, dengan wujud detektor berupa sintilator organik. Masalah yang muncul pada penentuan spektrum energi neutron melalui pengukuran ialah adanya pengaruh fungsi respons detektor terhadap spektrum terukur. Pengaruh fungsi respons terhadap spektrum terukur dinyatakan sebagai proses *folding*, yang menyebabkan terjadinya penyimpangan bentuk spektrum terukur terhadap spektrum sebenarnya. Oleh karena itu, dalam proses penentuan spektrum sebenarnya diperlukan proses *unfolding*, yaitu proses penghilangan atau pembersihan pengaruh fungsi respons detektor dari spektrum terukur, sehingga diperoleh spektrum sebenarnya^[1].

Hubungan antara spektrum terukur, fungsi respons detektor, dan spektrum sebenarnya dapat dinyatakan dalam sistem persamaan linear simultan. Pada dasarnya, penyelesaian masalah unfolding dapat dilakukan dengan metode dasar, seperti metode matriks balikan, metode kuadrat rerkecil biasa, dan metode eliminasi. Akan tetapi, metode dasar tersebut tidak dapat bekerja pada sistem persamaan yang besar. Alasan pertama gagalnya penerapan metode dasar ini karena matriks respons detektor sintilasi (sintilator), yang terlibat pada proses unfolding, mendekati singular, sehingga proses komputasi unfolding menjadi sangat sulit. Meskipun kesulitan proses komputasi dapat diatasi, masalah lain yang menyebabkan gagalnya penerapan metode dasar tersebut adalah munculnya ralat yang sangat besar pada hasil unfolding, yang disebabkan oleh fluktuasi statistik dari distribusi tinggi pulsa (cacah) spektrum terukur^[2].

Burrus, pada tahun 1961, telah mengembangkan metode unfolding yang dapat mengendalikan besarnya ralat pada hasil penyelesaian unfolding, yang dikenal dengan istilah FERD dan FERDO^[3]. Kemudian, berdasarkan hasil kerja dari Burrus tersebut telah dikembangkan versi lain dari FERDO, yang salah satunya dikenal

dengan nama kode SLOP. Kode SLOP dikembangkan dengan memodifikasi metode kuadrat terkecil biasa, dengan disertai asumsi bahwa hanya penyelesaian yang bernilai positif saja yang mungkin. Modifikasi yang diperkenalkan kode SLOP dilakukan dengan menambahkan parameter penghalus, pada proses minimalisasi jumlah simpangan kuadrat berbobot dalam metode kuadrat terkecil biasa^[2].

Melalui studi pustaka terhadap kode SLOP, dalam penelitian ini telah disusun program komputer unfolding. Kemudian program ini diterapkan pada proses unfolding spektrum sintilasi neutron dari sumber PuBe, yang diperoleh dari pengukuran dengan sintilator organik cair NE-213. Dari penerapan tersebut telah diketahui peranan parameter penghalus, yang diperkenalkan dalam kode SLOP, terhadap proses pengendalian ralat pada spektrum hasil unfolding.

B. Metode Unfolding

Hubungan antara spektrum terukur, fungsi respons, dan spektrum sebenarnya dinyatakan dengan persamaan integral Fredholm^[4], yaitu:

$$M(E) = \int_0^{\infty} A(E, E') X(E') dE' \quad (10.1)$$

Dalam hubungan ini, didefinisikan: $X(E) dE$ = spektrum sebenarnya (jumlah partikel yang dipancarkan dengan energi antara E dan $E+dE$), $M(E) dE$ = spektrum terukur (jumlah partikel yang terukur dengan energi antara E dan $E+dE$), $A(E, E') dE$ = respons detektor (kebolehjadian partikel yang dipancarkan oleh sumber berenergi E' akan terukur dengan energi antara E dan $E+dE$)

Persamaan (10.1) dapat didekati dengan persamaan matriks agar sesuai untuk perhitungan secara numerik, yaitu:

$$\mathbf{M} = \mathbf{A}\mathbf{X} \quad (10.2)$$

dalam hal ini $\mathbf{M}$ dan $\mathbf{X}$ adalah matriks kolom dan $\mathbf{A}$ adalah matriks bujur sangkar. Penyelesaian dasar untuk mendapatkan $\mathbf{X}$ adalah melalui persamaan:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{M} \quad (10.3)$$

Pada kenyataannya, penyelesaian dengan cara ini tidak dapat bekerja pada sistem persamaan yang besar. Hasil yang diperoleh akan mengandung ralat yang sangat besar dan sangat peka terhadap fluktuasi statistik spektrum terukur. Oleh karena itu, telah dikembangkan kode SLOP untuk mengendalikan terjadinya ralat tersebut.

Dasar matematika dari kode SLOP^[2] adalah modifikasi dari metode kuadrat terkecil biasa. Bila respons matriks $\mathbf{A}$ tidak mempunyai elemen negatif, maka batas atas dari penyelesaian $\mathbf{X}$ adalah:

$$x_i \leq \min_j \frac{M_i}{A_{ji}} \quad (10.4)$$

Jika digabungkan dengan asumsi bahwa penyelesaian x_i tidak pernah negatif, maka batasan penyelesaian x_i adalah:

$$0 \leq x_i \leq \min_j \frac{M_i}{A_{ji}} \quad (10.5)$$

Metode kuadrat terkecil biasa mencari penyelesaian $\mathbf{X}$ dengan meminimalkan jumlah simpangan kuadrat berbobot melalui persamaan:

$$L^2 = (\mathbf{AX} - \mathbf{M})^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{AX} - \mathbf{M}) \quad (10.6)$$

Modifikasi yang dilakukan dalam kode SLOP ialah dengan menambahkan suku penghalus pada persamaan (6), sehingga menjadi:

$$L^2 = (\mathbf{AX} - \mathbf{M})^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{AX} - \mathbf{M}) + \lambda (\mathbf{X} - \mathbf{d})^T \Delta^{-2} (\mathbf{X} - \mathbf{d}) \quad (10.7)$$

dalam hal ini: $\mathbf{d}$ = elemen diagonal dari $0,5(\mathbf{X}_{max} + \mathbf{X}_{min})$, Δ = elemen diagonal dari $0,5(\mathbf{X}_{max} - \mathbf{X}_{min})$, λ = parameter penghalus. $\mathbf{X}_{max}$ dan $\mathbf{X}_{min}$ adalah matriks diagonal dengan elemen x_i^{max} dan x_i^{min} , yang dihitung melalui persamaan (10.5).

Minimalisasi terhadap L^2 pada persamaan (10.7) dilakukan dengan mengambil turunan persialnya terhadap $\mathbf{X}$ sama dengan nol, yaitu:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{X}} = 2\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1}(\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{M}) + 2\lambda\Delta^{-2}(\mathbf{X} - \mathbf{d}) = 0 \quad (10.8)$$

$$2\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1}(\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{M}) + 2\lambda\Delta^{-2}(\mathbf{X} - \mathbf{d}) = 0 \quad (10.9)$$

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A} + \lambda\Delta^{-2})\mathbf{X} = \mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{M} + \lambda\Delta^{-2} \mathbf{d} \quad (10.10)$$

Dari persamaan (10.10), didapatkan penyelesaian estimasi $\hat{\mathbf{X}}$ dari $\mathbf{X}$, yaitu:

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A} + \lambda\Delta^{-2})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{M} + \lambda\Delta^{-2} \mathbf{d}) \quad (10.11)$$

atau

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A} + \lambda\Delta^{-2})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{M} + (\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A} + \lambda\Delta^{-2})^{-1} \lambda\Delta^{-2} \mathbf{d} \quad (10.12)$$

Dari identitas matriks, suku kedua pada persamaan (10.12) menjadi:

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A} + \lambda\Delta^{-2})^{-1} \lambda\Delta^{-2} \mathbf{d} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A} + \lambda\Delta^{-2})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{d} + \mathbf{d} \quad (10.13)$$

Dengan demikian kita dapatkan penyelesaian sebagai berikut:

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A} + \lambda\Delta^{-2})^{-1} [(\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{M} - \mathbf{A} \mathbf{d})) + \mathbf{d}] \quad (10.14)$$

Matriks varians dan kovarians dapat dihitung melalui persamaan:

$$\Sigma = \mathbf{H} \mathbf{V} \mathbf{H}^T \quad (10.15)$$

dalam hal ini $\mathbf{H}$ adalah:

$$\mathbf{H} = (\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A} + \lambda\Delta^{-2})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \quad (10.16)$$

dengan demikian, simpangan baku dari $\hat{\mathbf{X}}$ diperoleh melalui persamaan:

$$\mathbf{S}_x = \sqrt{\frac{(\mathbf{H} \mathbf{V} \mathbf{H}^T)}{\text{elemen diagonal}}} \quad (10.17)$$

Modifikasi terhadap metode kuadrat terkecil biasa menghasilkan ralat dalam bentuk lain. Jika diasumsikan ada suatu nilai eksak $\mathbf{X}_t$, maka nilai ralat akibat perbedaan nilai antara $\mathbf{X}_t$ dengan $\hat{\mathbf{X}}$ ialah:

$$\mathbf{X}_t - \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}_t - \{(\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A} + \lambda\Delta^{-2})^{-1} [\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{M} - \mathbf{A} \mathbf{d})] + \mathbf{d}\} \quad (10.18)$$

$$\mathbf{X}_t - \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}_t - \{(\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A} + \lambda\Delta^{-2})^{-1} [\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{A} \mathbf{X}_t - \mathbf{A} \mathbf{d})] + \mathbf{d}\} \quad (10.19)$$

$$\mathbf{X}_t - \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}_t - [\mathbf{H} \mathbf{A} (\mathbf{X}_t - \mathbf{d})] - \mathbf{d} \quad (10.20)$$

$$\mathbf{X}_t - \hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{I} - \mathbf{HA})(\mathbf{X}_t - \mathbf{d}) \quad (10.21)$$

Ralat ini dikenal dengan ralat bias (*error of bias*), yang nilainya terletak dalam interval berikut:

$$\begin{aligned} (\mathbf{I} - \mathbf{HA})^+(-\Delta) + (\mathbf{I} - \mathbf{HA})^- (\Delta) &\leq (\mathbf{I} - \mathbf{HA})(\mathbf{X} - \mathbf{d}) \\ &\leq (\mathbf{I} - \mathbf{HA})^+(\Delta) + (\mathbf{I} - \mathbf{HA})^-(-\Delta) \end{aligned} \quad (10.22)$$

dalam hal ini:

$$(\mathbf{I} - \mathbf{HA})^+(-\Delta) + (\mathbf{I} - \mathbf{HA})^- (\Delta) = \beta_{LO} \quad (\text{bias terendah})$$

$$(\mathbf{I} - \mathbf{HA})^+(\Delta) + (\mathbf{I} - \mathbf{HA})^-(-\Delta) = \beta_{UP} \quad (\text{bias tertinggi})$$

$$(\mathbf{I} - \mathbf{HA})^+ = \text{elemen positif dari } (\mathbf{I} - \mathbf{HA})$$

$$(\mathbf{I} - \mathbf{HA})^- = \text{elemen negatif dari } (\mathbf{I} - \mathbf{HA})$$

dengan demikian, daerah konfidensi dari penyelesaian $\mathbf{X}$ adalah:

$$\mathbf{X}_{UP} = \hat{\mathbf{X}} + \beta_{UP} + \mathbf{S}_x \quad (10.23)$$

$$\mathbf{X}_{LO} = \hat{\mathbf{X}} + \beta_{LO} - \mathbf{S}_x \quad (10.24)$$

Dalam spektroskopi diperlukan penyelesaian umum (misalkan $\hat{\mathbf{P}}$) yang merupakan fungsi dari penyelesaian $\hat{\mathbf{X}}$, yaitu:

$$\mathbf{P} = \mathbf{WX} \quad (10.25)$$

dalam hal ini $\mathbf{W}$ diinterpretasikan sebagai berikut: jika $\mathbf{W}$ dianggap sebagai fungsi respons detektor ideal, maka $\hat{\mathbf{P}}$ adalah spektrum terukur ideal. Simpangan baku dari $\hat{\mathbf{P}}$ ditentukan melalui persamaan:

$$\mathbf{S}_p = \sqrt{\underset{\text{elemen diagonal}}{(\mathbf{WHVH}^T \mathbf{W}^T)}} \quad (10.26)$$

Ralat bias ditentukan melalui persamaan:

$$\begin{aligned}
& [W(I - HA)]^+(-\Delta) + [W(I - HA)]^-(\Delta) \leq [W(I - HA)](X - d) \\
& \leq [W(I - HA)]^+(\Delta) + [W(I - HA)]^-(-\Delta)
\end{aligned} \tag{10.27}$$

dalam hal ini:

$$[W(I - HA)]^+(-\Delta) + [W(I - HA)]^-(\Delta) = \beta_{LO} \text{ (bias terendah)}$$

$$[W(I - HA)]^+(\Delta) + [W(I - HA)]^-(-\Delta) = \beta_{UP} \text{ (bias tertinggi)}$$

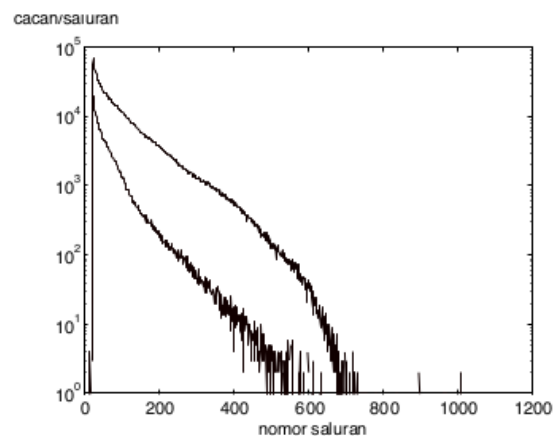
dengan demikian, interval konfidensi dari penyelesaian $\hat{\mathbf{P}}$ adalah:

$$\mathbf{P}_{UP} = \hat{\mathbf{P}} + \beta_{UP} + \mathbf{S}_p \tag{10.28}$$

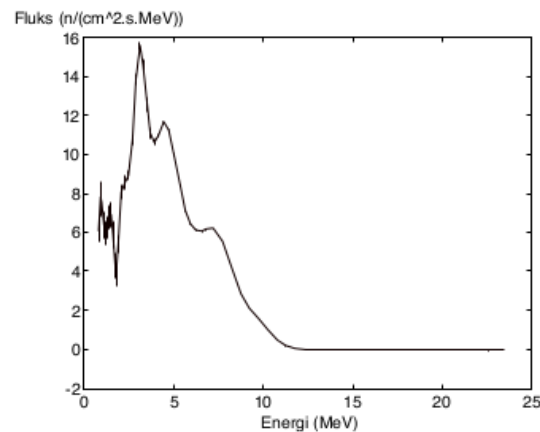
$$\mathbf{P}_{LO} = \hat{\mathbf{P}} + \beta_{LO} - \mathbf{S}_p \tag{10.29}$$

C. Hasil Unfolding dan Pembahasan

Dengan menggunakan matriks fungsi respons sintilator organik NE-213, matriks fungsi jendela dan data spektrum energi neutron PuBe (Gambar 10.1) dari paket program FERD-PC/PSR-273^[3] diperoleh hasil unfolding (spektrum unfolding) untuk dua nilai parameter penghalus (λ) sebagaimana tersaji pada Gambar 10.2 dan Gambar 10.3.

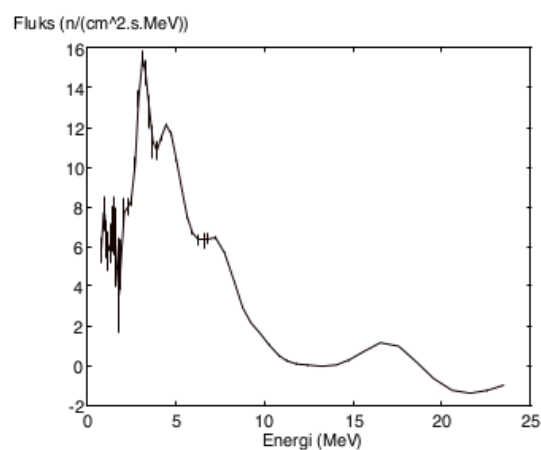


Gambar 10.1. Spektrum Neutron PuBe dari Sintilator NE-213

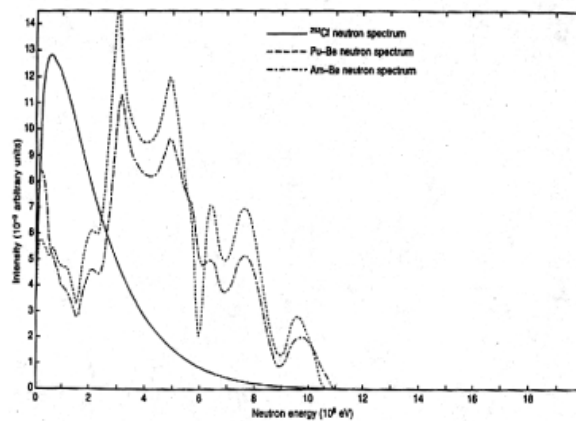


Gambar 10.2. Spektrum Neutron PuBe Hasil Unfolding Untuk $\lambda=10$

Ralat hasil unfolding dari metode SLOP sangat tergantung pada nilai parameter penghalus (λ). Dalam hal ini, ralat bias yang muncul sebagai akibat dari modifikasi pada metode kuadrat terkecil biasa tidak dihitung dalam program unfolding yang dibuat. Ketidak tepatan pemilihan nilai parameter tersebut akan mengakibatkan nilai ralat menjadi membesar, sebagaimana terlihat pada Gambar 10.3. Jika dibandingkan dengan spektrum energi PuBe yang dihasilkan dari pengukuran dengan metode TOF sebagaimana terlihat pada Gambar 10.4^[4], maka hasil unfolding dari program yang dibuat menunjukkan adanya kesesuaian yang baik.



Gambar 10.3. Spektrum Neutron PuBe Hasil Unfolding Untuk $\lambda=0$



Gambar 10.4. Spektrum Neutron dari Metode TOF

D. Kesimpulan

Program unfolding metode SLOP yang telah disusun mampu melakukan proses unfolding dengan ukuran maksimum matriks fungsi respons detektor sebesar 75x75. Program ini dapat melakukan proses unfolding spektrum sintilasi neutron dengan baik, dalam arti spektrum yang dihasilkan memiliki kesesuaian yang baik dengan spektrum energi neutron yang diperoleh dari pengukuran dengan metode TOF. Dengan demikian, program unfolding yang telah disusun dapat dipakai sebagai salah satu pilihan untuk keperluan spektroskopi neutron cepat berbasis sintilator organik.

E. Pustaka

- [1] Mutiara S., Pramudita A., dan Hartoyo S., 1989, "Dekonvolusi Dengan Metode Transformasi Fourier", Prosiding Simposium Fisika Nasional XII Himpunan Fisika Indonesia, 491-496.
- [2] Bogert, V. D. and Burrus, B. W., 1962. "The SLOP Code for Unfolding of Instrument Response", Neutron Physics Div. Annual Progress Report for The Period Ending Sept. 1, ORNL-3360.
- [3] Rooney, B. D., 1989, User's Manual for FERD-PC, ORNL/TM-11028.
- [4] Tsoulfanidis, N., 1983 : Measurement and Detection of Radiation, Hemisphere Publishing Co., New York.
- [5] IAEA, 1993, Handbook on Nuclear Data For Borehole Logging and Mineral Analysis, Vienna.

PROGRAM KOMPUTER UNFOLDING UNTUK SPEKTROSKOPI NEUTRON CEPAT

Ishafit, Kusminarto, dan Darsono

Intisari - Program komputer unfolding metode FERDOR untuk keperluan spektroskopi neutron cepat berbasis sintilator organik, yang dapat dijalankan dengan komputer IBM-PC/AT atau sejenisnya, telah dibuat dengan bahasa pemrograman Turbo Pascal versi 6.0. Program komputer unfolding ini telah diuji coba pada data spektrum energi neutron PuBe yang diperoleh dari pengukuran dengan sintilator organik cair NE-213. Hasil unfolding menunjukkan kesesuaian dengan spektrum energi yang diperoleh dari pengukuran dengan metode TOF.

Abstract – An unfolding computer code using the FERDOR method for fast neutron spectroscopic based on the organic scintillator which is executable on IBM-PC/AT computer or its compatible, has been made using Turbo Pascal programming language of the 6.0 version. This unfolding computer code has been tested by means of neutron energy spectrum data of PuBe obtained from the measurements with NE-213 liquid organic scintillator. The results show a good agreement with the energy spectrum obtained from the TOF methods.

A. Pendahuluan

Sintilator organik cair NE-213 diterima penggunaannya sebagai spektrometer neutron cepat sejak permulaan tahun 1960-an. Pada tahun 1968 dan 1969, dua buah artikel tentang NE-213 dipublikasikan, yang sekarang dianggap sebagai hasil studi yang mendalam tentang penerapan NE-213 dalam spektroskopi neutron cepat. Artikel pertama menguraikan secara mendalam tentang pengukuran dan perhitungan fungsi tanggap detektor NE-213 berukuran 5 cm x 5 cm-diameter terhadap neutron (Verbinski, dkk.,1968). Artikel kedua menguraikan tentang metodologi *unfolding* atau *unscrambling* spektrum sintilasi neutron (spektrum energi pantulan proton) dari NE-213^[1].

Alasan utama digunakannya NE-213 dalam spektroskopi neutron cepat karena spektrometer berbasis NE-213 relatif lebih sederhana dibandingkan dengan spektrometer *TOF (time of flight)*. Selain itu, NE-213 memberikan kompromi yang baik terhadap pencapaian efisiensi dan resolusi energi^[2].

Luasnya penggunaan sintilator organik cair NE-213 disebabkan karena selain mempunyai efisiensi yang baik juga mempunyai daya pisah yang baik terhadap spektrum gamma yang muncul bersama spektrum neutron^[3].

Dalam spektroskopi neutron dengan sintilator organik, spektrum energi yang diperoleh merupakan spektrum energi proton, yang dihasilkan dari proses tumbukan antara neutron dengan hidrogen sebagai penyusun bahan sintilator. Selain hal ini, spektrum energi yang diperoleh menyimpang jauh dari spektrum sebenarnya, karena adanya pengaruh fungsi tanggap sintilator yang tidak mengikuti fungsi gaussian. Oleh karena itu, proses *unfolding* harus dilakukan guna mendapatkan spektrum energi neutron yang sebenarnya.

Salah satu metode yang banyak dipakai untuk menyelesaikan masalah *unfolding* ialah metode kuadrat terkecil (*least square*). Akan tetapi, metode kuadrat terkecil biasa menghasilkan ralat yang sangat besar, yang disebabkan oleh bentuk matriks fungsi tanggap sintilator yang mendekati singular dan adanya fluktuasi statistik dari

distribusi tinggi pulsa (cacah) spektrum terukur^[4]. Burrus, pada tahun 1961, telah mengembangkan suatu metode yang mampu mengendalikan besarnya ralat pada hasil penyelesaian unfolding, yang melahirkan modifikasi pada metode kuadrat terkecil biasa. Metode yang dikembangkan dikenal dengan istilah FERD dan FERDO, dan salah satu versi pengembangan dari FERDO adalah FERDOR^[5]. Melalui studi pustaka telah disusun program komputer unfolding metode FERDOR dengan menggunakan komputer pribadi dan bahasa pemrograman Turbo Pascal versi 6.0. Kemudian, program ini diujicobakan pada proses unfolding spektrum sintilasi neutron PuBe, yang diperoleh dari pengukuran dengan sintilator organik cair NE-213.

B. Metode Unfolding FERDOR dalam Spektroskopi

Dengan asumsi bahwa terjadi hamburan isotropik pada proses tumbukan antara neutron dengan proton dalam sistem pusat massa, maka spektrum energi pentalan proton dinyatakan oleh persamaan:

$$N(E_p)dE_p = N_H T \int_0^{E_{mak}} \sigma(E_n) \phi(E_n) dE_n \frac{dE_p}{E_n} H(E_n - E_p) \quad (11.1)$$

dalam hal ini, N_H = jumlah atom hidrogen yang ditumbuk berkas neutron, T = waktu pengukuran pentalan proton, $H(E_n - E_p)$ = fungsi undak dengan nilai = 1 untuk $E_n > E_p$. Kemudian, persamaan untuk spektrum energi terukur diberikan oleh:

$$M(E)dE = \int_0^{E_{mak}} dE R(E, E) N(E_p) dE_p \quad (11.2)$$

E_{mak} adalah batas atas dari spektrum energi neutron. Persamaan (11.2) dapat dituliskan dalam bentuk:

$$M(E) = \int_0^{E_{mak}} A(E, E_n) \phi(E_n) dE_n \quad (11.3)$$

apabila $A(E, E_n)$ didefinisikan sebagai berikut:

$$A(E, E_n) = N_H T \int_0^{E_{mak}} \frac{\sigma(E_n)}{E_n} R(E, E_p) H(E_n - E_p) dE_n \quad (11.4)$$

dalam hal ini: $\phi(E_n)dE_n$ = spektrum energi neutron (fluks neutron dengan energi antara E_n dan E_n+dE_n), $N(E_p)dE_p$ = spektrum energi pantalan proton (jumlah proton yang dihasilkan dari tumbukan dengan neutron yang energinya antara E_p dan E_p+dE_p), $A(E, E_p)dE_p$ = fungsi tanggap detektor komposit (*composite*) untuk spektrometer pantalan proton (kebolehjadian bahwa proton dengan energi E_p akan terdeteksi dengan energi antara E_p dan E_p+dE_p), $M(E)dE$ = spektrum energi terukur (jumlah proton terukur dengan energi antara E dan $E+dE$)^[6].

Dalam eksperimen, pengukuran spektrum energi dilakukan dengan spektrometer MCA, sehingga hubungan antara spektrum terukur dengan spektrum sebenarnya, yang dinyatakan dengan persamaan (11.3), dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$M_i = \int_0^{E_{mak}} A_i(E) \phi(E) dE \quad (11.5)$$

Dalam hal ini: $A_i(E)$ adalah fungsi tanggap detektor untuk saluran ke i, M_i cacah rata-rata pada saluran ke i. Penerapan metode unfolding bertujuan menentukan $\phi(E)$ yang belum diketahui dari persamaan (11.5) tersebut. Dalam metode FERDOR, penyelesaian $\phi(E)$ didekati oleh suatu fungsi P_k yang didefinisikan sebagai berikut^{[1],[3]},

$$P_k = \int_0^{E_{mak}} W_k(E) \phi(E) dE \quad (11.6)$$

Dalam hal ini $W_k(E)$ didefinisikan sebagai fungsi tanggap detektor ideal, yang kemudian disebut sebagai fungsi jendela. Fungsi jendela ini tergantung pada energi E dan parameter resolusi σ dengan bentuk fungsi berupa gaussian, yaitu:

$$W_k(E) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(E_k - E)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (11.7)$$

Nilai σ tergantung pada parameter lebar jendela σ_w (*window width*).

Proses penentuan P_k dari data spektrum terukur M_i dilakukan dengan mengestimasi nilai $W_k(E)$ dari $A_i(E)$ melalui persamaan:

$$W_k(E) = \sum_i u_{ki} A_i(E) \quad (11.8)$$

dengan u_{ki} suatu koefisien. Dengan demikian diperoleh hubungan antara P_k dengan M_i sebagai berikut:

$$P_k = \sum_i^{NR} u_{ki} \int_0^\infty A_i(E) \varphi(E) dE \quad (11.9)$$

$$P_k = \sum_{i=1}^{NR} u_{ki} M_i \quad (11.10)$$

Ralat statistik dari persamaan (11.10) diberikan oleh persamaan:

$$std(\hat{p}) = std\left(\sum_{i=1}^{NR} u_i M_i\right) = \left(\sum_{i=1}^{NR} u_i^2 s_i^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (11.11)$$

Selain ralat tersebut, di dalam FERDOR terdapat ralat lain yang terjadi apabila:

$$W(E) \neq \sum_i u_i A_i(E) \quad (11.12)$$

Ralat yang terjadi akibat hal ini dengan notasi δ diestimasi melalui persamaan:

$$\delta = \sum_{i=1}^{NC} \left| W(E_j) - \sum_{i=1}^{NR} u_i A_i(E) \right| \left\{ M_{i^*(j)} / A_{i^*(j)}(E_j) \right\} \quad (11.13)$$

Dengan demikian, hasil penyelesaian unfolding akan memiliki interval konfidensi yang diberikan oleh dua persamaan:

$$p_k^{lo} = \sum_{i=1}^{NR} u_{ki} M_i - \left(\sum_{i=1}^{NR} u_{ki}^2 s_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \sum_j^{NC} \left| W_k(E_j) - \sum_{i=1}^{NR} u_{ki} A_i(E_j) \right| \left[(M_{i^*(j)} + s_{i^*(j)}) / A_{i^*(j)}(E_j) \right] \quad (11.14)$$

$$p_k^{up} = \sum_{i=1}^{NR} u_{ki} c_i + \left(\sum_{i=1}^{NR} u_{ki}^2 s_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \sum_j^{NC} \left| W_k(E_j) - \sum_{i=1}^{NR} u_{ki} A_i(E_j) \right| \left[(M_{i^*(j)} + s_{i^*(j)}) / A_{i^*(j)}(E_j) \right] \quad (11.15)$$

Kemudian, nilai koefisien u_{ki} ditentukan melalui proses minimalisasi ralat total ε :

$$\varepsilon = std(p) + \delta \quad (11.16)$$

Dengan menerapkan asas kuadrat terkecil pada proses minimalisasi ε diperoleh penyelesaian untuk koefisien $\mathbf{u}$ (dalam notasi matriks) sebagai berikut:

$$\mathbf{u} = [\mathbf{A}\mathbf{Q}^2\mathbf{A}^T + (\tau^2/Nc)\mathbf{S}^2]^{-1} \mathbf{A}\mathbf{Q}^2\mathbf{w} \quad (11.17)$$

dalam hal ini, $A_{ij} = A_i(E_j)$, $\mathbf{Q}$ = matriks diagonal : $Q_{ii} = \min_i [(M_i + s_i) / A_{ij}]$,

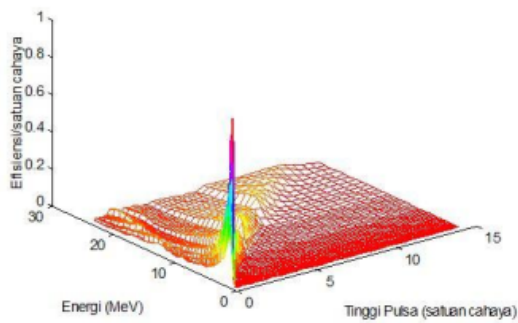
$\mathbf{S}$ =matriks diagonal : $S_{ij}=s_i$, $\mathbf{w} = W(E_j)$. Jika didefinisikan matriks $\mathbf{H}$ sebagai berikut:

$$\mathbf{H} = [\mathbf{A}\mathbf{Q}^2\mathbf{A}^T + (\tau^2/Nc)\mathbf{S}^2]^{-1} \mathbf{A}\mathbf{Q}^2 \quad (11.18)$$

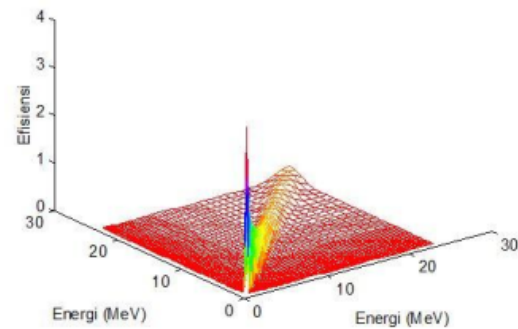
maka nilai u_{ki} dapat diperoleh dengan mengalikan matriks $\mathbf{H}$ dan *window vector* $W_k(E_j)$. Setelah nilai koefisien $\mathbf{u}_{ki}$ diperoleh, tahapan terakhir dari proses unfolding adalah menghitung nilai P_k dengan persamaan (11.14) dan persamaan (11.15).

C. Hasil Unfolding dan Pembahasan

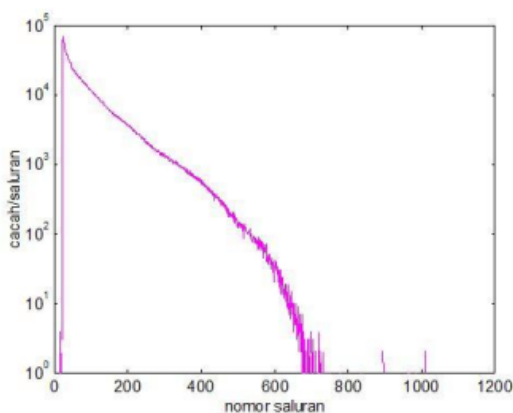
Dengan menggunakan matriks fungsi tanggap sintilator organik NE-213 (Gambar 11.1), matriks fungsi jendela (Gambar 11.2) dan data spektrum energi neutron PuBe (Gambar 11.3) dari paket program FERD-PC/PSR-273^[5], diperoleh hasil unfolding (spektrum unfolding) sebagaimana tersaji pada Gambar 11.4, 11.5 dan 11.6.



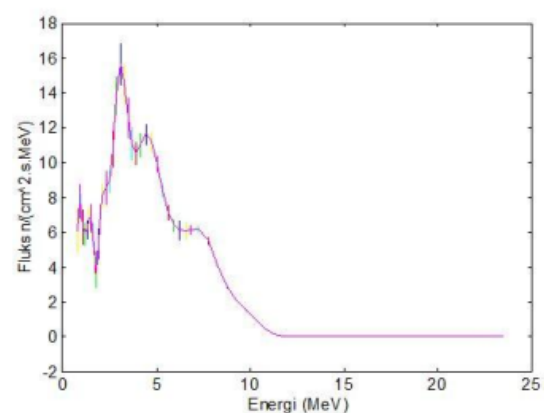
Gambar 11.1. Matriks Fungsi Tanggap NE-213^[5]



Gambar 11.2. Matriks Fungsi Jendela^[5]

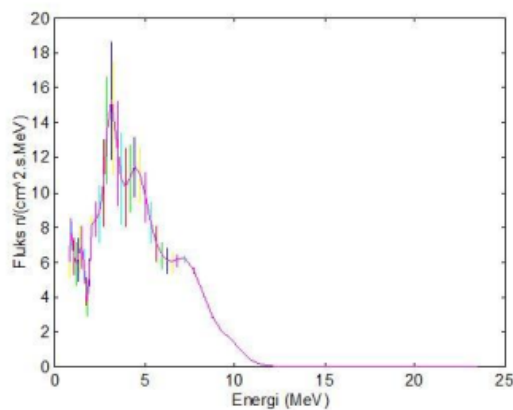


Gambar 11.3. Spektrum Neutron PuBe dari Sintilator NE-213^[5]

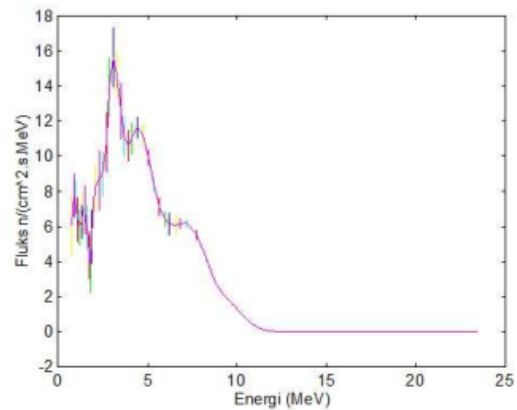


Gambar 11.4. Spektrum Neutron PuBe Hasil Unfolding Untuk $\tau=30$ (Hasil penelitian ini)

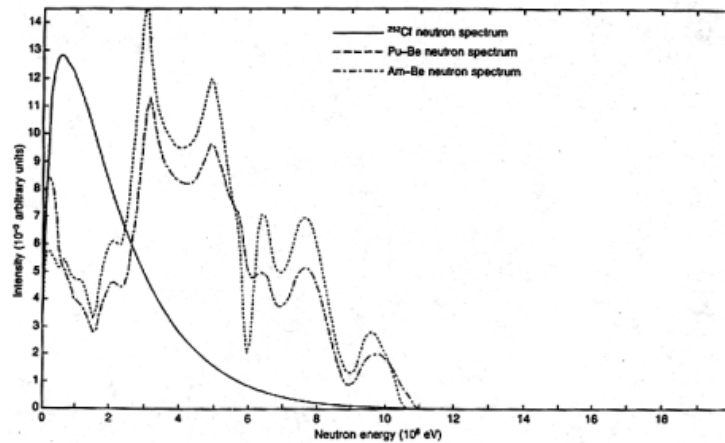
Ralat hasil unfolding dari metode FERDOR sangat tergantung pada nilai parameter penghalus (τ), yang muncul sebagai akibat dari modifikasi pada metode kuadrat terkecil biasa. Dari hasil uji coba program, nilai parameter yang baik, dalam arti menghasilkan ralat kecil (Gambar 11.4), terletak di sekitar nilai 30. Ketidaktepatan penentuan nilai parameter tersebut akan mengakibatkan nilai ralat menjadi membesar, sebagaimana terlihat pada Gambar 11.5 dan Gambar 11.6. Jika dibandingkan dengan spektrum energi PuBe yang dihasilkan dari pengukuran dengan metode TOF sebagaimana terlihat pada Gambar 11.7^[7], maka hasil unfolding dari program yang dibuat menunjukkan adanya kesesuaian yang baik.



Gambar 11.5. Spektrum Neutron PuBe Hasil Unfolding Untuk $\tau=20$ (Hasil penelitian ini)



Gambar 11.6. Spektrum Neutron PuBe Hasil Unfolding Untuk $\tau=40$ (Hasil penelitian ini)



Gambar 11.5. Spektrum Neutron PuBe Hasil Unfolding Untuk $\tau=20$ (Hasil penelitian ini)

D. Kesimpulan

Program unfolding metode FERDOR yang telah disusun mampu melakukan proses unfolding dengan ukuran maksimum matriks fungsi tanggap detektor sebesar 75x75. Program ini dapat melakukan proses unfolding spektrum sintilasi neutron dengan baik, dalam arti spektrum yang dihasilkan memiliki kesesuaian yang baik dengan spektrum energi neutron yang diperoleh dari pengukuran dengan metode TOF. Dengan demikian, program unfolding yang telah disusun dapat dipakai sebagai salah satu pilihan untuk keperluan spektroskopi neutron cepat berbasis sintilator organik.

E. Pustaka

- [1] Burrus, W. R., and Verbinski, V.V., 1969, "Fast-Neutron Spectroscopy With Thick Organic Scintillator", Nuclear Instruments and Methods, 67:181-196.
- [2] Johnson, R.H., Ingersoll, D.T., Wehring, B.W., and Dorning, J.J., 1977, "NE-213 Neutron Spectrometry System For Measurements From 1.0 To 20 MeV", Nuclear Instruments and Methods, 145:337-346.
- [3] Shin, K. Uwamino, Y. and Hyodo, T., 1980, "Propagation Of Errors From Response Functions To Unfolded Spectrum", Nuclear Technology, 53:78-85.
- [4] Bogert, V. D. and Burrus, B. W., 1962, "The SLOP Code For Unfolding Of Instrument Response", Neutron Physics Div. Annual Progress Report For Periode Ending Sept. 1, ORNL-3360.
- [5] Rooney, B. D., 1989, User's Manual for FERD-PC, ORNL/TM-11028.
- [6] Tsoulfanidis, N., 1983 : Measurement and Detection of Radiation, Hemisphere Publishing Co., New York.
- [7] IAEA, 1993, Handbook on Nuclear Data For Borehole Logging and Mineral Analysis, Vienna.

LAMPIRAN: Algoritma Metode Unfolding FERDOR

- (1) Membaca Data Cacah pada setiap saluran (M)

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ - \\ M_{NR} \end{pmatrix}$$

- (2) Membaca Data Energi, Pulse Height dan Binning Width
- (3) Melakukan Proses Binning Data Spektrum
- (4) Membaca data Matriks Tanggap Detektor (A)

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & - & a_{1Nc} \\ a_{12} & a_{22} & - & a_{2Nc} \\ - & - & - & - \\ a_{Nr1} & a_{Nr2} & - & a_{NrNc} \end{pmatrix}$$

- (5) Membuat Matriks Diagonal Q dan S:

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & - & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{NrNc} \end{pmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & - & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{NrNc} \end{pmatrix}$$

(6) Menghitung Matriks $H = [AQ^2A^\top + (\tau^2/NC)S^2]^{-1}AQ^2$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{21} & - & h_{Nc1} \\ h_{21} & h_{22} & - & h_{Nc2} \\ - & - & - & - \\ h_{Nr1} & h_{Nr2} & - & h_{NrNc} \end{pmatrix}$$

(7) Menghitung vektor jendela $W_k(E_j)$:

$$W_{kj} = \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{E_k - E_j}{\sigma_k} \right)^2}$$

(8) Menghitung vektor u_k melalui persamaan:

$$u = H w$$

(9) Menghitung nilai p_k^{lo} dan p_k^{up} dengan persamaan:

$$p_k^{lo} = \sum_{i=1}^{NR} u_{ki} M_i - \left(\sum_{i=1}^{NR} u_{ki}^2 s_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \sum_j^{NC} \left| W_k(E_j) - \sum_{i=1}^{NR} u_{ki} A_i(E_j) \right| \left[(M_{i^*(j)} + s_{i^*(j)}) / A_{i^*(j)}(E_j) \right]$$

$$p_k^{up} = \sum_{i=1}^{NR} u_{ki} M_i + \left(\sum_{i=1}^{NR} u_{ki}^2 s_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \sum_j^{NC} \left| W_k(E_j) - \sum_{i=1}^{NR} u_{ki} A_i(E_j) \right| \left[(M_{i^*(j)} + s_{i^*(j)}) / A_{i^*(j)}(E_j) \right]$$

(10) Mengulangi proses (7) s.d. (9) untuk $k=1$ sampai dengan $k=Nc$

Pusparagam dalam TIKPF0000.pdf

ORIGINALITY REPORT

15%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	www.coursehero.com Internet	36 words — 1%
2	aminmusofa.blogspot.com Internet	32 words — 1%
3	core.ac.uk Internet	25 words — 1%
4	www.988.com Internet	25 words — 1%
5	dokodoc.com Internet	23 words — 1%
6	"Methods for determining soil hydraulic parameters related to vertical rainwater infiltration", Sabo Gakkaishi, 2006 Publications	21 words — 1%
7	docplayer.net Internet	19 words — 1%
8	aes.asn.au Internet	17 words — 1%
9	www.pustaka.ut.ac.id Internet	17 words — 1%
10	ltps.uad.ac.id Internet	16 words — 1%

11	Dominique Paret, Serge Sibony. "Musical Techniques", Wiley, 2017 Crossref	14 words — < 1 %
12	pdfcoffee.com Internet	14 words — < 1 %
13	www.ieomsociety.org Internet	14 words — < 1 %
14	"Annual Index for Volume 79, 2002", Journal of Chemical Education, 2002. Crossref	13 words — < 1 %
15	rezaikhtiar.files.wordpress.com Internet	13 words — < 1 %
16	www.cse.unl.edu Internet	13 words — < 1 %
17	a-research.upi.edu Internet	12 words — < 1 %
18	ejournal.poltektegal.ac.id Internet	11 words — < 1 %
19	junaedyanthon.blogspot.com Internet	11 words — < 1 %
20	moam.info Internet	11 words — < 1 %
21	repository.trisakti.ac.id Internet	11 words — < 1 %
22	scholar.archive.org Internet	11 words — < 1 %
23	text-id.123dok.com	

24 Dwi Nanto, Maila D.H. Rahiem, Tita Khalis Maryati. "Emerging Trends in Technology for Education in an Uncertain World", Routledge, 2021

Publications

9 words — < 1 %

25 abra.fkkt.uni-lj.si

Internet

9 words — < 1 %

26 pasca-pfisika.uad.ac.id

Internet

9 words — < 1 %

27 Atkins, Peter, de Paula, Julio, Keeler, James. "Atkins' Physical Chemistry", Atkins' Physical Chemistry, 2023

Publications

8 words — < 1 %

28 elearning.uad.ac.id

Internet

8 words — < 1 %

29 esatuduatiga.wordpress.com

Internet

8 words — < 1 %

30 pps.uny.ac.id

Internet

8 words — < 1 %

31 uigm.ac.id

Internet

8 words — < 1 %

32 www.scribd.com

Internet

8 words — < 1 %

33 Abdul Azis Rasjid, Arif Hidayat, . "Banyumas; Fiksi & Fakta Sebuah Kota", Open Science Framework, 2017

Publications

6 words — < 1 %

EXCLUDE QUOTES OFF
EXCLUDE BIBLIOGRAPHY ON

EXCLUDE SOURCES OFF
EXCLUDE MATCHES OFF