



UNNES
Universitas Negeri Semarang

**Simulasi Gerak Elektron
Dalam Medan Listrik dan Medan Magnet
dengan Metode Runge-Kutta Menggunakan Scratch**

Skripsi

Disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
Program Studi Fisika

Oleh :
Arief Afandy
4211412076

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

2017



UNNES
Universitas Negeri Semarang

**Simulasi Gerak Elektron
Dalam Medan Listrik dan Medan Magnet
dengan Metode Runge-Kutta Menggunakan Scratch**

Skripsi

Disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
Program Studi Fisika

Oleh :

Arief Afandy

4211412076

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

2017

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul ” **Simulasi Gerak Elektron Dalam Medan Listrik dan Medan Magnet dengan Metode Runge-Kutta Menggunakan Scratch** “ disusun berdasarkan hasil penelitian saya dengan arahan dosen pembimbing. Sumber informasi atau kutipan karya orang lain yang terdapat dalam skripsi ini dikutip berdasarkan kode etik ilmiah. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.

Semarang, Januari 2017



Arief Afandy
NIM 4211412076



UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Simulasi Gerak Elektron Dalam Medan Listrik dan Medan Magnet dengan
Metode Runge-Kutta Menggunakan Scratch

disusun oleh

Arief Afandy

4211412076

telah dipertahankan dihadapan sidang Panitia Ujian Skripsi FMIPA Unnes pada
tanggal 1 Febuari 2017

Panitia Ujian :

Ketua



Prof. Dr. Zaenuri, S.E., M.Si., Akt.
NIP 196412231988031001

Sekretaris

Dr. Suharto Linuwih, M.Si.
NIP 196807141996031005

Ketua Penguji

Drs. Hadi Susanto, M.Si.
NIP 195308031980031003

Anggota Penguji/
Pembimbing Utama

Prof. Dr. rer. nat. Wahyu Hardyanto, M.Si.
NIP 196011241984031002

Anggota Penguji/
Pembimbing Pendamping

Isa Akhlis, S.Si, M.Si.
NIP 197001021999031002

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

- *Alam serta hukum-hukumnya tersembunyi dalam gelap malam; Lalu Tuhan bersabda, Terjadilah Newton ! lalu segalanya terang benderang. (Alexander Pope)*
- *Karena berjuang tak pernah se-asik ini. (Berbagi Nasi Semarang)*
- *Keberhasilan adalah kemampuan untuk melewati dan mengatasi dari satu kegagalan ke kegagalan berikutnya tanpa kehilangan semangat. (Winston Churchill)*



PERSEMBAHAN :

1. Ayahku Sutaryono dan Ibuku Mei Saroh
2. Adikku Diva Amalia
3. Keluarga besar mbah Sukarti dan keluarga besar ninik Mardiah
4. Guru-guruku
5. Sahabat dan teman seperjuangan

PRAKATA

Hidup Mahasiswa !!!

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penyusunan skripsi yang berjudul “ **Simulasi Gerak Elektron Dalam Medan Listrik dan Medan Magnet dengan Metode Runge-Kutta Menggunakan Scratch**”. Shalawat dan salam tak lupa penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW dan para sahabat.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini tidak akan berhasil tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Fathur Rohkman, M.Hum, selaku Rektor Universitas Negeri Semarang.
2. Prof. Dr. Zaenuri, S.E., M.Si., Akt, selaku Dekan FMIPA Universitas Negeri Semarang.
3. Dr. Suharto Linuwih, M.Si. selaku Ketua Jurusan Fisika Universitas Negeri Semarang.
4. Prof. Dr. rer. nat. Wahyu Hardyanto, M.Si. selaku Dosen Pembimbing I atas segala arahan, bimbingan, masukan, dan kesabarannya dalam membimbing penulis.
5. Isa Akhlis, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing II atas segala arahan, bimbingan, masukan, dan kesabarannya dalam membimbing penulis.

6. Sugiyanto, M.Si. selaku Validator yang telah memberikan kritik dan saran yang berguna untuk penyempurnaan skripsi.
7. Drs. Hadi Susanto, M.Si. selaku Validator atas segala arahan dan masukan dalam penyempurnaan skripsi.
8. Ayah, Ibu dan Adik penulis, yang tak pernah lelah memberikan kasih sayang, doa, semangat serta keyakinan yang tiada henti untuk penulis.
9. Rekan-rekan satu bimbingan (Fajar, Dodoh, Eko, Yuliana, Riswandha, Shella, Qohar, *et al.*), terima kasih atas semangat yang diberikan kepada penulis selama berjuang bersama.
10. Teman-teman jurusan Fisika 2012, terima kasih atas diskusi-diskusi dan canda tawa selama penulis menempuh perkuliahan.
11. Rekan-rekan BEM FMIPA, UKM CATUR, KMJF, KOPHI JATENG, dan BERNAS yang selalu mengingatkan penulis untuk segera lulus.
12. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari ketidaksempurnaan dalam penulisan skripsi ini. Untuk itu penulis menerima segala kritik dan saran demi pengembangan skripsi ini. Akhir kata penulis berharap semoga skripsi ini dapat berguna bagi semua pihak yang membutuhkan.

Semarang, Januari 2017

Penulis

ABSTRAK

Afandy, A. 2017. *Simulasi Gerak Elektron Dalam Medan Listrik dan Medan Magnet dengan Metode Runge-Kutta Menggunakan Scratch*. Skripsi. Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Utama Prof. Dr. rer. nat. Wahyu Hardyanto, M.Si. dan Pembimbing Pendamping Isa Akhlis, S.Si, M.Si.

Kata kunci: Runge-Kutta, gerak elektron, Scratch, medan listrik, medan magnet

Pergerakan elektron dalam medan listrik dan medan magnet merupakan hal yang sukar untuk diamati. Salah satu teknik dalam mengamati pergerakan elektron adalah dengan solusi numerik dan ditampilkan bentuk lintasan elektron dengan bantuan komputer. Ada banyak jenis solusi numerik, salah satunya adalah metode Runge-Kutta. Pada penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan simulasi gerak elektron dalam medan listrik dan medan magnet dengan metode Runge-Kutta untuk ditampilkan pada software Scratch serta mengetahui perbandingan ketelitian metode Runge-Kutta jika dibandingkan metode numerik lainnya. Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini meliputi persiapan, pelaksanaan pengembangan program, validasi hasil, dan analisis data. Dari hasil perancangan program scratch, dihasilkan 4 jenis simulasi gerak elektron dalam medan listrik dan medan magnet, yaitu : (1) Gerak elektron dalam medan magnet konstan. (2) Gerak elektron dalam medan listrik searah medan magnet. (3) Gerak elektron dalam medan listrik tegak lurus medan magnet dengan kecepatan awal tidak = 0. (4) Gerak elektron dalam medan listrik tegak lurus medan magnet dengan kecepatan awal = 0. Ketelitian dari metode Runge-Kutta untuk posisi elektron dalam sumbu y mencapai 99.9995 % dan 99.98199 % untuk posisi elektron dalam sumbu z. Dari hasil validasi aspek materi, aspek komputasi dan aspek Rekyasa Perangkat Lunak & Tampilan mendapatkan penilaian rata-rata sebesar 87.5 % dan dinyatakan sangat layak untuk digunakan. Dari hasil perbandingan antara metode Runge-Kutta dan metode Feynman-Newton, didapatkan hasil bahwa metode Runge-Kutta lebih teliti jika dibandingkan dengan metode Feynman-Newton.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN	iii
PENGESAHAN	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	v
PRAKATA.....	vi
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Batasan Masalah.....	6
1.6 Sistematika Penulisan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Gerak Partikel Bermuatan dalam Medan Listrik dan Magnet	7
2.1.1 Gerak dalam Medan Magnet Konstan	8
2.1.2 Gerak dalam Medan Listrik Konstan	11
2.1.3 Gerak dalam Kombinasi Medan Listrik dan Medan Magnet ...	13
2.2. Solusi Analitik Gerak Elektron	17
2.2.1 Solusi Analitik Gerak dalam Medan Listrik Tegak Lurus Medan Magnet Konstan	17
2.3. Solusi Numerik Gerak Elektron.....	23
2.3.1 Metode Runge-Kutta Orde 4	24

2.3.2	Metode Feynman-Newton	29
2.4.	Scratch.....	31
2.5.	Bagian-Bagian Scratch.....	33
2.6.	<i>Blocks Pallate</i>	35
2.7.	Grafik pada Scratch.....	39
 BAB III METODE PENELITIAN		
3.1	Penentuan Obyek Penelitian	43
3.2	Persiapan	43
3.2.1	Identifikasi Masalah	43
3.2.2	Kajian Pustaka	43
3.2.3	Lokasi Penelitian	44
3.2.4	Alat dan Bahan	44
3.3	Pelaksanaan Pengembangan Program.....	45
3.3.1	Perancangan Program Scratch	45
3.3.2	Penentuan Solusi Numerik	47
3.3.3	Penentuan Solusi Analitik	48
3.4	Validasi Hasil.....	48
3.5	Metode Analisis Data.....	50
3.5.1	Perbandingan Solusi Analitik dan Solusi Numerik	50
3.5.2	Perbandingan Metode Runge-Kutta dengan Metode Feynman-Newton	51
3.5.3	Analisis Kelayakan Simulasi	52
 BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		
4.1	Hasil Penelitian	55
4.1.1	Penulisan <i>Script</i> Runge-Kutta pada Scratch	55
4.1.2	Diskripsi Perancangan Program Scratch	59
4.1.3	Simulasi dalam Medan Magnet Konstan	61
4.1.4	Simulasi dalam Kombinasi Medan Searah Medan Magnet	64
4.1.5	Simulasi Elektron yang Bergerak dengan Kecepatan Awal dalam Medan Listrik Tegak Lurus Medan Magnet	67
4.1.6	Simulasi Analitik Elektron yang Bergerak dengan Kecepatan	

Awal = 0 dalam Medan Listrik Tegak Lurus Medan Magnet ..	69
4.1.7 Simulasi Analitik Elektron yang Bergerak dengan Kecepatan Awal = 0 dalam Medan Listrik Tegak Lurus Medan Magnet Dengan Metode Runge-Kutta	72
4.1.8 Simulasi Analitik Elektron yang Bergerak dengan Kecepatan Awal = 0 dalam Medan Listrik Tegak Lurus Medan Magnet dengan Metode Feynman-Newton	73
4.2 Pembahasan.....	75
4.2.1 Perbandingan Ketelitian Metode Runge-Kutta dengan Metode Feynman-Newton	75
4.2.2 Hasil Validasi Ahli	78
BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	83
5.2 Saran.....	84
DAFTAR PUSTAKA	85
LAMPIRAN.....	89

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2. 1	Keterangan <i>Blocks Motion</i> 35
Tabel 2. 2	Keterangan <i>Blocks Sounds</i> 36
Tabel 2. 3	Keterangan <i>Blocks Pen</i> 36
Tabel 2. 4	Keterangan <i>Blocks Looks</i> 37
Tabel 2. 5	Keterangan <i>Blocks Sensing</i> 37
Tabel 2. 6	Keterangan <i>Blocks Controls</i> 37
Tabel 2. 7	Keterangan <i>Blocks Numbers</i> 38
Tabel 2. 8	Keterangan <i>Blocks Variabel</i> 39
Tabel 3.1	Perbandingan kesalahan relatif metode Runge-Kutta dan Feynman-Newton 52
Tabel 3.2	Rentang persentase kelayakan simulasi 53
Tabel 4.1.	Hasil validasi terhadap aspek materi 79
Tabel 4.2.	Hasil validasi terhadap aspek komputasi 80
Tabel 4.3.	Hasil validasi terhadap aspek RPL dan Tampilan 81

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Aturan tangan kanan	8
Gambar 2.2 komponen-komponen vektor dari elektron yang bergerak dengan kecepatan (v) dalam medan magnet (B)	9
Gambar 2.3 Gerak melingkar pada partikel bermuatan positif (atas) dan negatif (bawah)	10
Gambar 2.4 Gerak heliks partikel bermuatan sepanjang B	10
Gambar 2.5 Gerak heliks untuk partikel bermuatan positif (kiri) dan partikel bermuatan negatif (kanan)	11
Gambar 2.6 Elektron yang ditembakkan tegak lurus dengan medan listrik konstan	12
Gambar 2.7 Gerak dalam medan listrik searah medan magnet	14
Gambar 2.8 Komponen vektor arah gerak dalam medan listrik tegak lurus medan magnet	14
Gambar 2.9 Trajektori gerak <i>trochoid</i> dalam medan listrik tegak lurus medan magnet	15
Gambar 2.10 Gerak <i>cycloid</i> partikel bermuatan positif	16
Gambar 2.11 Perbedaan lintasan elektron dan ion	16
Gambar 2.12 Penggambaran geometris dari metode Runge-Kutta Orde-4	27
Gambar 2.13 <i>Slope</i> Pada metode Feynman-Newton	30
Gambar 2.14 Tampilan <i>Windows</i> Scratch 1.4	33
Gambar 2.15 Tampilan <i>Windows</i> Scratch 2.0	34
Gambar 2.16 <i>Blocks Pallate</i> pada Scratch	35
Gambar 2.17 Posisi x dan y pada layar Scratch 1.4	40
Gambar 2.18 Penggambaran koordinat Scratch dan Koordnat Kartesian .	40
Gambar 3.1 Diagram alir dari simulasi yang akan dikembangkan	46
Gambar 3.2 Diagram alir penelitian	54
Gambar 4.1 Penulisan <i>script</i> Runge-Kutta Y dan Z pada Scratch	56

Gambar 4.2	<i>Update</i> nilai Y dan Z pada Scratch	57
Gambar 4.3	Penulisan <i>script</i> Runge-Kutta untuk sumbu x pada Scratch	58
Gambar 4.4	<i>Update</i> nilai x pada Scratch	58
Gambar 4.5	Desain Awal Tampilan Program pada Scratch	59
Gambar 4.6	Simulasi gerak elektron dalam medan magnet $E=0$	61
Gambar 4.7	Gerak melingkar elektron diakibatkan gaya Lorentz	62
Gambar 4.8	Lintasan dari elektron ketika kecepatan searah medan magnet dikurangi	63
Gambar 4.9	Simulasi gerak elektron dalam medan listrik searah medan magnet	64
Gambar 4.10	Simulasi gerak elektron dalam medan listrik 500 N/C searah medan magnet	66
Gambar 4.11	Simulasi gerak heliks dengan medan listrik 100 N/C	67
Gambar 4.12	Simulasi gerak dalam kombinasi medan listrik tegak lurus medan magnet yang dengan kecepatan awal elektron tidak sama dengan nol	68
Gambar 4.13	Simulasi gerak <i>trochoid</i> dengan Nilai $E_z= 500 \text{ N/C}$	69
Gambar 4.14	Simulasi gerak elektron yang ditembakkan dengan kecepatan awal dalam medan listrik tegak lurus medan magnet menggunakan Runge-Kutta	70
Gambar 4.15	Perbandingan lintasan metode analitik dan metode numerik	73
Gambar 4.16	Algoritma Feynman-Newton menggunakan Scratch	74

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1	<i>Source-Code</i> bagian <i>Stage Backdrop</i> 90
Lampiran 2	<i>Source-Code</i> bagian Inisialisasi Nilai Awal 91
Lampiran 3	<i>Source-Code</i> bagian <i>Ploting</i> 92
Lampiran 4	<i>Source-Code</i> Tombol pemilih jenis Simulasi 93
Lampiran 5	Instrumen Validasi Aspek Materi 94
Lampiran 6	Instrumen Validasi Aspek Komputasi 98
Lampiran 7	Kriteria Penilaian Validasi Aspek Komputasi 101
Lampiran 8	Instrumen Validasi Aspek Rekayasa Perangkat Lunak & Tampilan 103
Lampiran 9	Kriteria Penilaian Validasi Aspek Rekayasa Perangkat Lunak & Tampilan 106
Lampiran 10	Hasil Validasi Aspek Materi 108
Lampiran 11	Hasil Validasi Aspek Komputasi 112
Lampiran 12	Hasil Validasi Aspek Rekayasa Perangkat Lunak & Tampilan 115
Lampiran 13	Hasil Perhitungan Validasi Aspek Materi 118
Lampiran 14	Hasil Perhitungan Validasi Aspek Komputasi 119
Lampiran 15	Hasil Perhitungan Validasi Aspek Rekayasa Perangkat Lunak & Tampilan 120
Lampiran 16	Hasil Perhitungan Uji Kelayakan Simulasi 121
Lampiran 17	Hasil Perhitungan Error Relatif Runge-Kutta dan Feynman-Newton 122
Lampiran 18	Panduan Penggunaan Simulasi 132
Lampiran 19	Surat Keputusan Penetapan Dosen Pembimbing 138
Lampiran 20	Surat Tugas Ujian Skripsi 139

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ilmu fisika mempelajari fenomena alam dari hal yang berukuran sangat kecil hingga benda-benda yang berukuran sangat besar. Hal ini menyebabkan dalam mempelajari fisika sering menemui kendala-kendala. Kendala-kendala tersebut diantaranya adalah ukuran benda yang akan dipelajari relatif kecil dan gejala yang dipelajari prosesnya sangat cepat (Zarlis, 2007).

Pada pokok bahasan listrik-magnet, sering dijumpai hal-hal yang bersifat abstrak. Sebagai contoh pergerakan elektron dalam medan listrik dan medan magnet. Ukuran elektron yang memiliki massa sangat kecil yaitu $9,1 \times 10^{-31}$ kg serta kecepatannya yang bergerak dengan kecepatan yang sangat cepat menyebabkan pengamatan elektron secara langsung sangat tidak memungkinkan (Serway, 2004: 712).

Para ahli fisika teoritis menggunakan konsep-konsep yang sudah ada dan memformulasikan dalam bahasa matematis untuk mempelajari hal-hal yang bersifat abstrak (Longair, 2003: 6). Para ahli hanya dapat menduga lintasan gerak elektron dalam medan listrik dan medan magnet mengikuti apa yang dirumuskan dalam persamaan gaya Lorentz. Terdapat 2 cara dalam menentukan solusi dari persamaan gaya Lorentz, yaitu dengan cara Analitik dan Numerik.

Solusi analitik merupakan suatu metode yang memberikan solusi sejati atau

solusi sesungguhnya karena memiliki galat yang bernilai nol (Tresnaningsih, 2010: 1). Tetapi solusi analitik memiliki kelemahan yaitu tidak semua permasalahan matematis dapat diselesaikan serta proses penyelesaiannya yang sangat rumit (Sudadi & Teguh, 2015: 1). Bila solusi analitik tidak dapat digunakan, maka digunakan solusi numerik untuk menyelesaikan persamaan matematis yang sangat rumit.

Solusi Numerik adalah teknik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan matematis dengan menggunakan operasi matematika sederhana, yaitu operasi tambah, kurang, kali, bagi (Sudadi & Teguh, 2015: 1). Solusi Numerik merupakan solusi hampiran (pendekatan) sehingga selalu memiliki galat. Pemilihan metode numerik yang tepat bertujuan untuk menemukan perhitungan yang dapat membuat galat sekecil mungkin dan perhitungan menjadi efisien (Sutarno, 2005: 2).

Untuk menyelesaikan persamaan matematika secara numerik dapat dilakukan dengan bantuan komputer. Bantuan tersebut pada prinsipnya dapat dilakukan dengan berbagai cara misalnya dengan deretan angka-angka, gambar, grafik, atau visualisasi dengan komputer (Chapra, 1996: 44). Dalam menjelaskan fenomena fisika, tanpa adanya media atau simulasi, mahasiswa atau siswa hanya dapat berimajinasi untuk memahami konsep-konsep fisika yang abstrak ini. (Salafudin, 2014).

Sebelumnya telah dilakukan penelitian oleh Salafudin (2014) untuk mengembangkan media visualisasi tiga dimensi berbasis Scratch materi listrik magnet. Dalam penelitian, Salafudin berfokus untuk mengembangkan media 3

dimensi materi listrik magnet dan mengetahui kelayakan media tersebut. Didapatkan hasil bahwa media yang dihasilkan masuk dalam kriteria sangat baik berdasarkan hasil validasi ahli media dan validasi ahli materi.

Media yang dikembangkan Salafudin masih memiliki kelemahan dari segi aspek materi. Salafudin menggunakan metode numerik Feynman-Newton untuk menghitung langkah ke- n dari simulasi yang dikembangkan. Metode Feynman-Newton adalah modifikasi dari metode euler, dimana untuk menghitung langkah ke- n digunakan setengah langkah sebelumnya (Hardyanto, 2005 :120). Media yang dikembangkan dengan metode Feynman-Newton masih terdapat galat (*error*) yang relatif besar. Salafudin menyarankan untuk memperhatikan aspek materi untuk pengembangan selanjutnya.

Dalam metode numerik terdapat banyak metode, salah satu metode yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan gerak berupa persamaan diferensial adalah metode Runge-kutta (Hardyanto, 2005: 119). Menurut Anidu *et al.* (2015), Algoritma Runge-Kutta dapat digunakan untuk menyelesaikan turunan orde 1 dan orde 2 dengan baik pada persamaan diferensial biasa.

Metode Runge kutta adalah salah satu metode numerik mencapai ketelitian dari suatu pendekatan deret taylor tanpa memerlukan kalkulasi turunan yang lebih tinggi (Lu, n.d. : 9). Metode Runge-kutta lebih teliti jika dibandingkan dengan metode Euler dikarenakan metode Runge-Kutta dapat menyelesaikan persamaan diferensial dengan pertumbuhan *truncation error* yang lebih kecil (Suprianto, 2006).

Agar dapat dijalankan oleh komputer, persamaan matematis dalam notasi

algoritmik harus diterjemahkan ke dalam notasi bahasa pemrograman. Pemrograman (koding) adalah pengubahan bentuk algoritma ke program komputer menggunakan bahasa komputer. Bahasa komputer yang digunakan dalam menulis program dinamakan bahasa pemrograman (Sutarno, 2005: 9).

Ada banyak bahasa pemrograman yang dapat digunakan untuk melakukan simulasi. Dalam penelitiannya, Azam *et al.* (2007) menggunakan Matlab 7 untuk menghasilkan simulasi partikel bermuatan dalam medan listrik dan magnet. Tetapi Matlab 7 merupakan *software* berbayar, sehingga peneliti harus membeli lisensi terlebih dahulu jika akan menuliskan bahasa pemrograman menggunakan Matlab.

Salah satu *software* yang dapat menuliskan bahasa pemrograman yang tidak berbayar adalah Scratch. Scratch adalah bahasa pemrograman visual yang dikembangkan oleh MIT Media Lab dari *Massachusetts Institute of Technology* (<https://scratch.mit.edu/about>). Filosofi dari *Scratch* adalah “*Learning is best when learning is fun*” (Belajar itu Paling Baik kalau Menyenangkan).

Saat ini penggunaan Scratch sangat populer karena bersifat *open source* sehingga dapat digunakan secara gratis oleh siapapun (<https://scratch.mit.edu/about>). Selain itu Scratch dapat digunakan di berbagai macam *platform* seperti Windows, Linux, MAC, dll (<https://scratch.mit.edu/about>). Dibandingkan bahasa pemrograman lain, Scratch tidak perlu mengetik *coding* dalam mengembangkan suatu program. Pengguna hanya perlu *drop and drag* blok-blok Scratch ke *script area*. Hal ini dapat menghindari kesalahan dalam pengetikan *coding* (<https://scratch.mit.edu/about>).

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan perbaikan metode numerik untuk memodelkan gerak elektron dalam medan listrik dan medan magnet dengan *software* Scratch. Dimana metode numerik yang digunakan adalah metode Runge-kutta.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah dituliskan, rumusan masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimanakah simulasi gerak elektron dalam medan listrik dan medan magnet dengan metode numerik Runge-Kutta menggunakan *software* Scratch?
2. Bagaimanakah perbandingan ketelitian simulasi metode Runge-kutta dengan metode Feynman-Newton?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka penelitian ini memiliki tujuan, yaitu :

1. Menghasilkan simulasi fenomena gerak elektron dalam medan listrik dan medan magnet dengan metode numerik Runge-Kutta menggunakan *software* Scratch.
2. Mengetahui perbandingan hasil simulasi metode Runge-kutta dengan metode Feynman-Newton.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah dapat menunjukkan lintasan elektron saat melintasi medan listrik dan medan magnet secara akurat dengan menggunakan visualisasi komputer.

1.5 Batasan Masalah

Pembatasan masalah yang diterapkan dalam penyusunan laporan skripsi adalah untuk menghasilkan model simulasi dengan Scratch untuk gerak elektron dipengaruhi medan listrik luar dan medan magnet luar konstan menggunakan metode numerik Runge-Kutta orde 4.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi dibagi menjadi :

- Bab 1 Berisi tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah
- Bab 2 Berisi tentang teori-teori dan konsep-konsep yang mendasari penelitian.
- Bab 3 Membahas metodologi penelitian mencakup desain penelitian, diagram alir penelitian, dan metode analisis data.
- Bab 4 Membahas tentang hasil penelitian dengan pembahasan mengacu pada teori oleh Bab 2.
- Bab 5 Berisi simpulan dan saran berdasarkan hasil penelitian. Pada bagian akhir skripsi terdapat daftar pustaka dan lampiran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Gerak Partikel Bermuatan dalam Medan Listrik dan Magnet

Menurut Bittencourt, (2004: 34), gaya total yang mempengaruhi gerak partikel bermuatan dalam medan listrik dan medan magnet eksternal dirumuskan mengikuti hukum Lorentz, yang dituliskan sebagai berikut :

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_E + \vec{F}_M \quad (2.1)$$

Dalam rumus diatas, terdiri dari 2 gaya, yaitu gaya listrik (F_E) dan gaya magnetik (F_M) sehingga secara umum dapat dijabarkan menjadi :

$$\vec{F}_E = q\vec{E} \quad (2.2)$$

$$\vec{F}_M = q[\vec{v} \times \vec{B}] \quad (2.3)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.2) dan (2.3) kedalam persamaan (2.1), didapatkan hasil gaya Lorentz sebagai berikut :

$$\sum \vec{F} = q[\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})] \quad (2.4)$$

Dengan menggunakan Hukum Newton kedua :

$$\sum \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (2.5)$$

Maka :

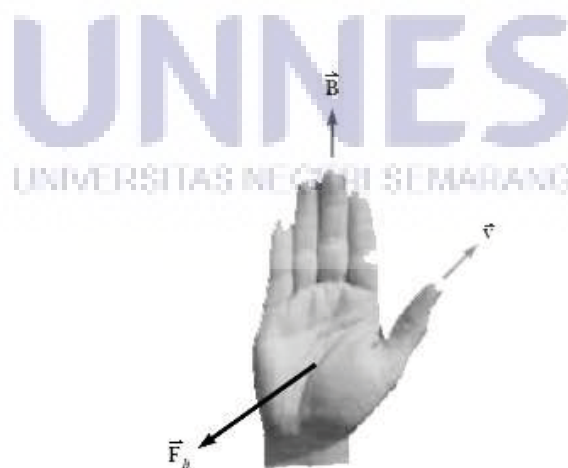
$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q[\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})] \quad (2.6)$$

Percepatan total gerak partikel bermuatan dipengaruhi medan listrik dan medan magnet eksternal terdiri dari 2 gaya, yaitu gaya listrik (\vec{F}_E) dan gaya magnetik (\vec{F}_M) sehingga dapat dirumuskan :

$$\vec{a} = \frac{q}{m} [\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})] \quad (2.7)$$

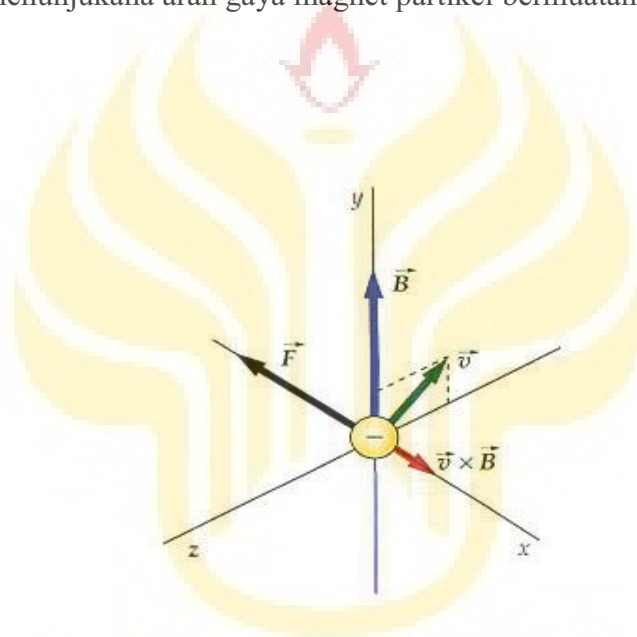
2.1.1 Gerak dalam Medan Magnet Konstan (Medan Listrik $F_E = 0$)

Untuk gerak partikel dalam medan magnet konstan, gaya yang bekerja hanyalah gaya magnetik saja. Untuk penentuan arah vektor yang bekerja pada gaya magnetik, digunakan aturan tangan kanan. Keempat ujung jari menunjukkan arah medan magnet (\vec{B}). Ibu jari menunjukkan arah kecepatan awal dari partikel bermuatan positif (\vec{v}) dan Telapak tangan merupakan *cross product* dari $\vec{v} \times \vec{B}$ yang menunjukkan arah gaya magnet (Serway, 2004: 898). Aturan tangan kanan ditunjukkan pada Gambar 2.1.



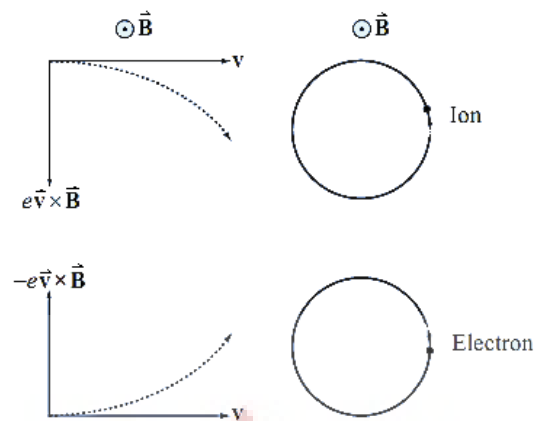
Gambar 2.1 Aturan tangan kanan (Serway, 2004: 898)

Untuk partikel bermuatan negatif (atau biasa disebut elektron), arah vektor dari gaya magnetik berlawanan arah dengan arah *cross-product* $\vec{v} \times \vec{B}$ seperti ditunjukkan Gambar 2.2. Untuk lebih mudahnya, penentuan arah vektor dapat digunakan aturan tangan kiri. Ujung jari tangan kiri menunjukkan arah medan magnet (\vec{B}) dan ibu jari tangan kiri merupakan kecepatan (\vec{v}). Sedangkan telapak tangan kiri menunjukkan arah gaya magnet partikel bermuatan negatif.



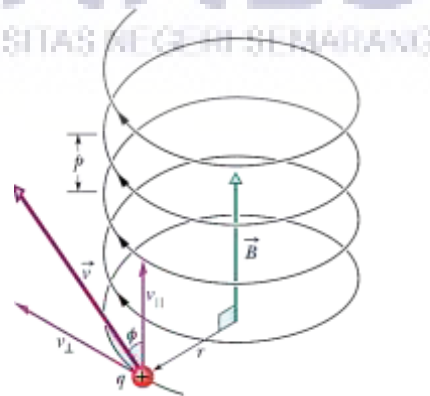
Gambar 2.2 Komponen-komponen vektor dari elektron yang bergerak dengan kecepatan (\vec{v}) dalam medan magnet (\vec{B}) (Tipler, 1990)

Menurut Freidberg (2012), ketika partikel bermuatan ditembakkan dengan kecepatan awal (\vec{v}) ke arah kanan pada medan magnet dengan arah keluar layar. Partikel akan dibelokkan sesuai arah gaya $\vec{v} \times \vec{B}$ sehingga membentuk lintasan berupa lingkaran. Arah pembelokan partikel bermuatan positif akan berlawanan arah dengan partikel bermuatan negatif seperti ditunjukkan Gambar 2.3.



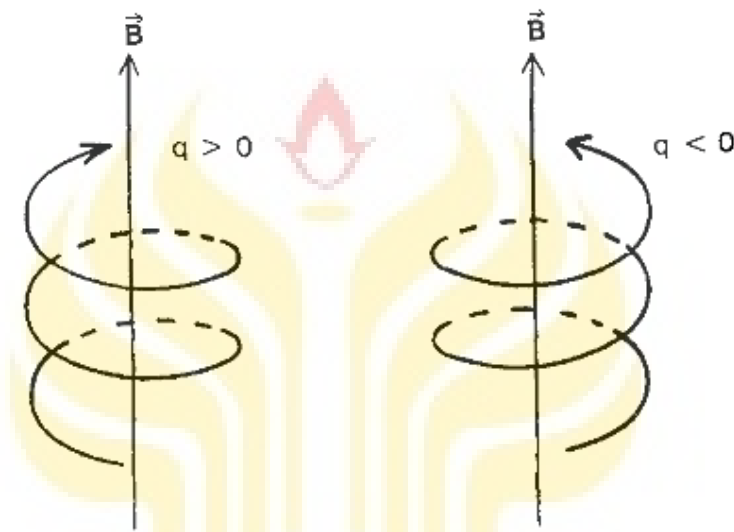
Gambar 2.3 Gerak melingkar pada partikel bermuatan positif (atas) dan negatif (bawah) (Freidberg, 2012).

Jika partikel bermuatan ditembakkan dengan kecepatan awal (\vec{v}) dalam medan magnet \vec{B} membentuk sudut θ terhadap arah medan magnet \vec{B} , maka komponen kecepatan (\vec{v}) dapat diuraikan menjadi kecepatan yang searah dengan arah medan magnet \vec{B} dan kecepatan yang tegak lurus dengan arah medan magnet B (Moisan & Pelletier, 2012). Penguraian kecepatan ini menyebabkan gerakan membentuk lintasan heliks. Penggambaran dari gerak heliks dapat dilihat pada Gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4 Gerak heliks partikel bermuatan sepanjang \vec{B} (Moisan & Pelletier, 2012).

Gerak heliks dari partikel bermuatan negatif memiliki perbedaan arah dengan partikel bermuatan positif. Sebagai acuan, untuk menentukan arah gerak helik partikel bermuatan positif menggunakan aturan kanan. Penggambaran perbedaan dari gerak helik partikel bermuatan ditunjukkan Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Gerak heliks untuk partikel bermuatan positif (kiri) dan partikel bermuatan negatif (kanan) (Moisan & Pelletier, 2012).

2.1.2 Gerak dalam Medan Listrik Konstan (Medan Magnet $F_M = 0$)

Jika medan magnet bernilai 0, maka gaya yang bekerja pada gaya Lorentz hanyalah gaya listrik (\vec{F}_E). Sehingga persamaan gaya Lorentz dituliskan kembali menjadi:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q[\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})]$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m}[\vec{E} + 0] \quad (2.8)$$

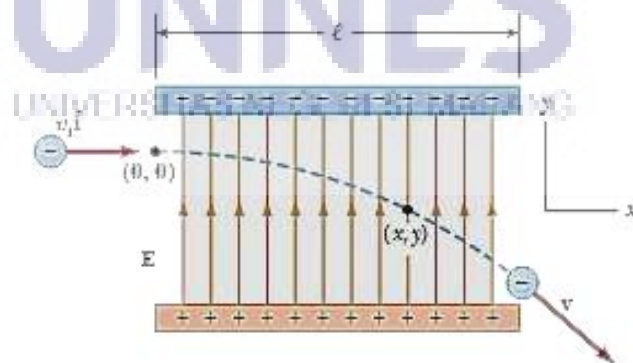
$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m} \vec{E} \quad (2.9)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan (2.9), didapatkan nilai posisi dari gerak dalam medan listrik sebagai berikut (Moisan & Pelletier, 2012: 105).

$$\vec{v} = \frac{q}{m} \vec{E}t + \vec{v}_0 \quad (2.10)$$

$$\vec{r} = \frac{q}{m} \vec{E}t^2 + \vec{v}_0t + \vec{r}_0 \quad (2.11)$$

Sesuai konvensi Internasional, arah gerak dari partikel bermuatan positif akan searah dengan arah medan listrik. Sedangkan untuk partikel bermuatan negatif, arah geraknya akan berlawanan arah dengan arah medan Listrik (Tipler, 2001: 579). Lintasan dari elektron yang melewati medan listrik konstan ditunjukkan Gambar 2.6. Dapat terlihat bahwa saat elektron ditembakkan dengan kecepatan yang tegak lurus dengan arah medan listrik, maka gerakan dari partikel akan membentuk lintasan parabola berlawanan arah dengan arah medan listrik. Persis seperti gerakan dipengaruhi medan gravitasi bumi (Serway, 2004: 727).

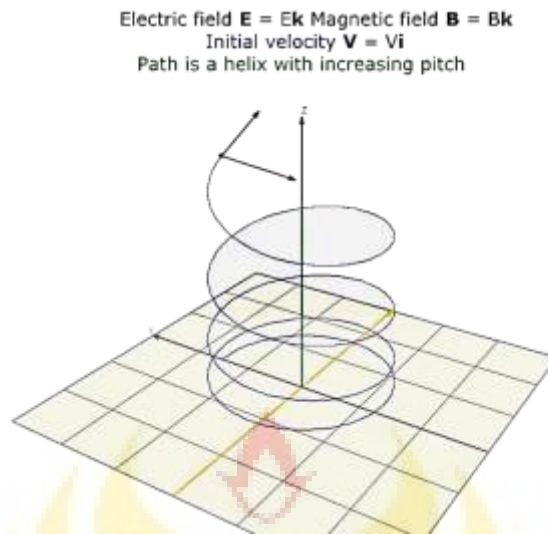


Gambar 2.6 Elektron yang ditembakkan tegak lurus dengan medan listrik konstan (Serway, 2004: 727).

2.1.3 Gerak dalam Kombinasi Medan Listrik dan Medan Magnet

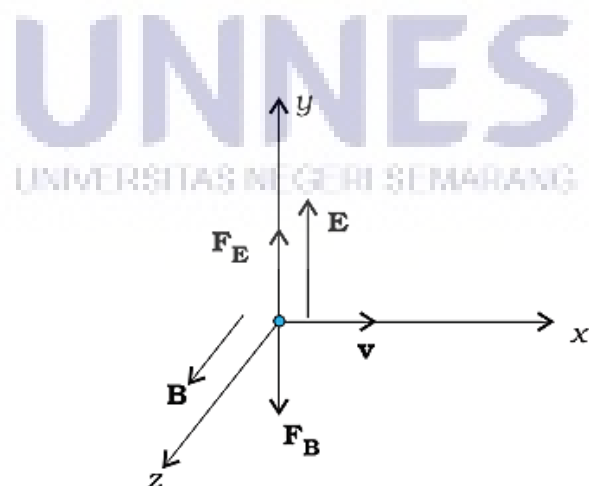
Ada banyak kasus yang melibatkan gerak partikel bermuatan dalam kombinasi medan listrik dan medan magnet. Dalam bukunya yang berjudul *Physics of Collisional Plasmas* (Moisan & Pelletier, 2012) menjelaskan mengenai kasus-kasus gerak partikel bermuatan dalam medan listrik dan medan magnet. Diantaranya adalah (1) Gerak dalam medan listrik searah medan magnet. (2) Gerak dalam medan listrik tegak lurus dengan medan magnet dengan kecepatan awal tidak sama dengan nol dan (3) gerak dalam medan listrik tegak lurus dengan medan magnet dengan kecepatan awal sama dengan nol.

Surendranath, B (nd) menjelaskan mengenai gerak partikel bermuatan dalam medan medan listrik searah medan magnet. Saat partikel bermuatan positif bergerak tegak lurus dengan medan magnet, maka akan membentuk lintasan helik. Tetapi saat terdapat medan listrik yang searah dengan medan magnet, maka gerakan searah medan magnet akan dipercepat oleh gaya listrik searah medan magnet, sehingga *path* dari heliks akan semakin bertambah lebar. Lintasan Gerak dalam medan listrik searah medan magnet dapat dilihat pada Gambar 2.7.



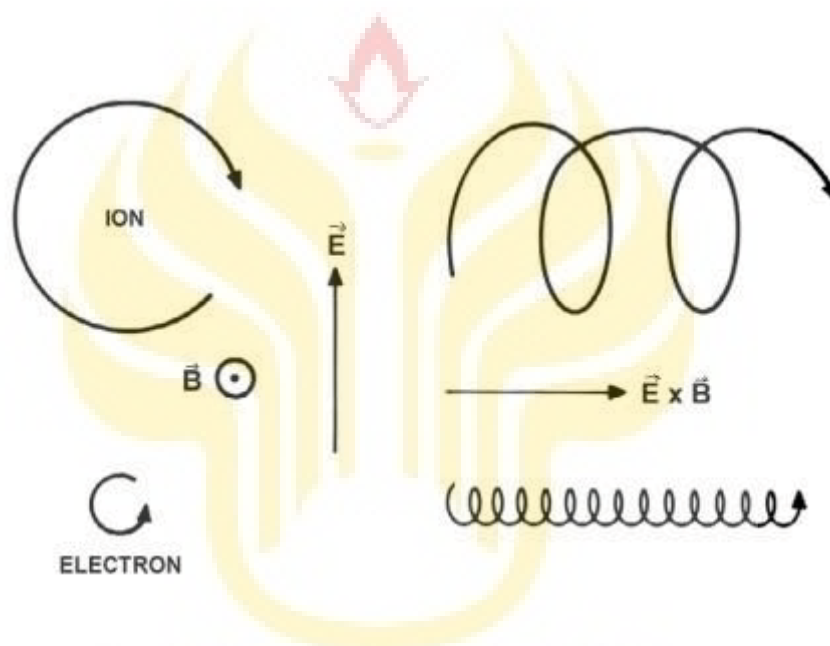
Gambar 2.7 Gerak dalam medan listrik searah medan magnet (Surendranath, B,nd)

Gerak dalam medan medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus dapat dijelaskan melalui vektor arah gerak. Vektor arah gerak ini sangat mempengaruhi arah gerak partikel bermuatan. Masing-masing komponen Arah vektor dari gerak partikel bermuatan positif dalam medan listrik tegak lurus dengan medan magnet ditunjukkan ditunjukkan Gambar 2.8.



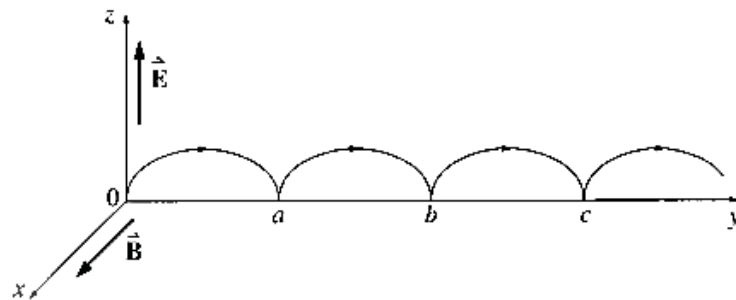
Gambar 2.8 Komponen vektor arah gerak dalam medan listrik tegak lurus medan magnet (Serway, 2004).

Dari penjelasan Gambar 2.8, maka lintasan dari partikel bermuatan akan berbentuk *trochoid* (Bittencourt, 2004: 53). Bentuk lintasan gerak partikel bermuatan positif (ion) yang melalui kombinasi medan listrik tegak lurus dengan medan magnet akan menghasilkan bentuk lintasan yang berbeda dengan partikel bermuatan negatif (elektron). Perbedaan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.9.



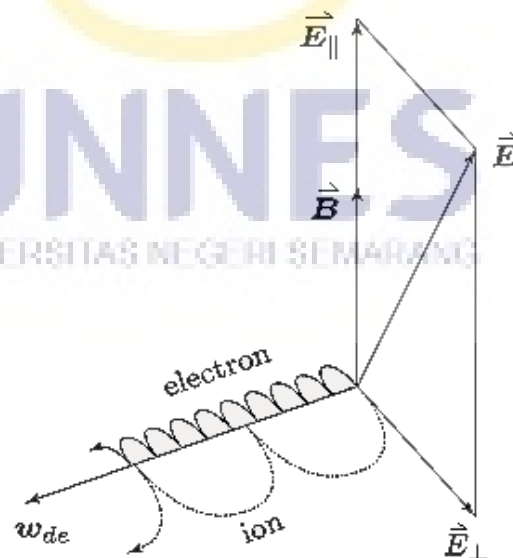
Gambar 2.9 Trajektori gerak *trochoid* dalam medan listrik tegak lurus medan magnet (Bittencourt, 2004: 53).

Berbeda kasus ketika partikel diletakan dalam pusat koordinat. Partikel tersebut dikenai medan listrik yang tegak lurus dengan medan magnet, maka partikel bermuatan akan terdorong oleh gaya listrik. Karena partikel bermuatan bergerak tegak lurus dengan arah medan magnet, maka partikel akan dibelokan setengah lingkaran secara periodik sehingga gerakan ini disebut gerakan *cycloid* (Griffith, 2000: 206). Gambar gerakan *cycloid* dapat dilihat dalam gambar 2.10



Gambar 2.10 Gerak Cycloid partikel bermuatan positif (Griffith, 2000: 206)

Elektron dan ion akan memiliki bentuk lintasan yang berbeda. Dimana pada Ion atau partikel bermuatan positif akan memiliki *radius Larmor* dan *pitch* yang lebih besar jika dibandingkan dengan partikel bermuatan negatif. Elektron akan mempunyai lintasan yang berlawanan arah dengan lintasan ion (Moisan & Pelletier, 2012: 122). Perbedaan lintasan tersebut seperti ditunjukkan Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Perbedaan lintasan elektron dan ion (Moisan & Pelletier, 2012: 122)

2.2 Solusi Analitik Gerak Elektron

Solusi analitik merupakan suatu metode yang memberikan solusi sejati atau solusi sesungguhnya karena memiliki galat yang bernilai nol (Tresnaningsih, 2010: 1). Solusi analitik biasanya dituliskan dalam bentuk fungsi matematik yang selanjutnya dapat dievaluasi untuk menghasilkan nilai dalam bentuk angka (Sudiadi & Teguh., 2015: 1). Karena tidak semua kasus dalam gerak elektron dapat dicari solusi analitiknya, maka dipilih kasus gerak elektron yang diletakan dengan kecepatan awal =0 dalam medan listrik tegak lurus dengan medan magnet.

Menurut Wiyanto (2002: 78) solusi umum dari gerak elektron dituliskan sebagai berikut

$$y(t) = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t - \frac{E}{B} t + C_3 \quad (2.12)$$

$$z(t) = C_2 \cos \omega t - C_1 \sin \omega t + C_4 \quad (2.13)$$

Penurunan rumus gerak elektron dalam medan listrik tegak lurus medan magnet dapat dilihat dalam subbab 2.2.1

2.2.1 Solusi Analitik Gerak dalam Medan Listrik Tegak Lurus Medan Magnet Konstan

Menurut Moisan & Pelletier, (2012: 103) Persamaan Lorentz dapat dituliskan :

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = q \left[E(r, t) + \frac{dr}{dt} \times B(r, t) \right] \quad (2.14)$$

Dengan r adalah jarak dalam sumbu kartesian. Nilai r dapat dijabarkan menjadi x , y , z . Maka persamaan (2.14) dapat dijabarkan menjadi

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = q \left[E_x + \left(B_z \frac{dy}{dt} - B_y \frac{dz}{dt} \right) \right] \quad (2.15)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = q \left[E_y + \left(B_z \frac{dx}{dt} - B_x \frac{dz}{dt} \right) \right] \quad (2.16)$$

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = q \left[E_z + \left(B_x \frac{dy}{dt} - B_y \frac{dx}{dt} \right) \right] \quad (2.17)$$

Agar lebih sederhana, maka kita asumsikan bahwa arah medan magnet B hanya searah sumbu x saja. Sehingga persamaan (2.15), (2.16), (2.17) menjadi :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = q [E_x + (0)] \quad (2.18)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = q \left[E_y + \left(0 - B_x \frac{dz}{dt} \right) \right] \quad (2.19)$$

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = q \left[E_z + \left(B_x \frac{dy}{dt} - 0 \right) \right] \quad (2.20)$$

Percepatan dari masing-masing komponen adalah :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{q}{m} E_x \quad (2.21)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{q}{m} E_y - \frac{q}{m} B_x \frac{dz}{dt} \quad (2.22)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{q}{m} E_z + \frac{q}{m} B_x \frac{dy}{dt} \quad (2.23)$$

Dimana

$$\omega = \frac{qB_x}{m} \quad (2.24)$$

Maka persamaan dituliskan menjadi :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{q}{m} E_x \quad (2.25)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{q}{m} E_y - \omega \frac{dz}{dt} \quad (2.26)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{q}{m} E_z + \omega \frac{dy}{dt} \quad (2.27)$$

Mengehitung trajektori dengan mengintegalkan persamaan (2.27), didapatkan:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{q}{m} E_z t + \omega y \quad (2.28)$$

Subtitusikan persamaan (2.28) ke persamaan (2.26)

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{q}{m} E_y - \omega \left[\frac{q}{m} E_z t + \omega y \right] \quad (2.29)$$

didapatkan persamaan *LHS* Homogen

$$a_y + \omega^2 y = -\omega \frac{q}{m} E_z t + \frac{q}{m} E_y \quad (2.30)$$

Dengan Solusi

$$y = A_1 \cos \omega t + A_2 \sin \omega t - \frac{q}{m\omega} E_z t + \frac{q}{m\omega^2} E_y \quad (2.31)$$

Nilai A1 dan A2 dapat dicari dengan memberikan kondisi $y_{t=0} = 0$ maka didapatkan solusi

$$0 = A_1 \cos(0) + A_2 \sin(0) - \frac{q}{m\omega} E_z(0) + \frac{q}{m\omega^2} E_y \quad (2.32)$$

$$0 = A_1 + \frac{q}{m\omega^2} E_y \quad (2.33)$$

$$A_1 = -\frac{q}{m\omega^2} E_y \quad (2.34)$$

Nilai A_2 dapat dicari dengan memberikan kondisi $V_{y(t=0)} = 0$ maka didapatkan solusi

$$0 = A_2 \omega - \frac{q}{m\omega} E_z \quad (2.35)$$

$$A_2 \omega = \frac{q}{m\omega} E_z \quad (2.36)$$

$$A_2 = \frac{q}{m\omega^2} E_z \quad (2.37)$$

Substitusikan persamaan A_1 dan A_2 ke persamaan (2.31) sehingga didapatkan

$$y = -\frac{q}{m\omega^2} E_y \cos \omega t + \frac{q}{m\omega^2} E_z \sin \omega t - \frac{q}{m\omega} E_z t + \frac{q}{m\omega^2} E_y \quad (2.38)$$

Untuk mencari nilai V_z Substitusikan persamaan (2.38) ke persamaan (2.28)

$$v_z = \frac{q}{m} E_z t + \omega \left[-\frac{q}{m\omega^2} E_y \cos \omega t + \frac{q}{m\omega^2} E_z \sin \omega t - \frac{q}{m\omega} E_z t + \frac{q}{m\omega^2} E_y \right] \quad (2.39)$$

$$v_z = \frac{q}{m} E_z t - \frac{q}{m\omega} E_y \cos \omega t + \frac{q}{m\omega} E_z \sin \omega t - \frac{q}{m} E_z t + \frac{q}{m\omega} E_y \quad (2.40)$$

Setelah di integralkan, didapatkan hasil

$$z = -\frac{q}{m\omega^2} E_y \sin \omega t - \frac{q}{m\omega^2} E_z \cos \omega t + \frac{q}{m\omega} E_y t + C3 \quad (2.41)$$

Dengan memberikan kondisi $z_{(t=0)} = 0$ maka didapatkan solusi

$$0 = -\frac{q}{m\omega^2} E_y \sin(0) - \frac{q}{m\omega^2} E_z \cos(0) + \frac{q}{m\omega} E_y (0) + C3 \quad (2.42)$$

$$0 = -\frac{q}{m\omega^2} E_z + C3 \quad (2.43)$$

$$C3 = \frac{q}{m\omega^2} E_z \quad (2.44)$$

Maka persamaan untuk sumbu z menjadi

$$z = -\frac{q}{m\omega^2} E_y \sin \omega t - \frac{q}{m\omega^2} E_z \cos \omega t + \frac{q}{m\omega} E_y t + \frac{q}{m\omega^2} E_z \quad (2.45)$$

Untuk mencari posisi dalam sumbu x, dicari dengan mengintegalkan persamaan (2.21) 2 x, didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$v_x = \frac{q}{m} E_x t \quad (2.46)$$

$$x = \frac{1}{2} \frac{q}{m} E_x t^2 \quad (2.47)$$

Jika arah medan Listrik hanya searah sumbu z ($E_x=E_y=0$), maka persamaan (2.47), (2.38), (2.45) dapat disederhanakan.

$$x = \frac{1}{2} \frac{q}{m} (0)t^2 \quad (2.48)$$

$$x = 0 \quad (2.49)$$

$$y = -\frac{q}{m\omega^2} (0) \cos \omega t + \frac{q}{m\omega^2} E_z \sin \omega t - \frac{q}{m\omega} E_z t + \frac{q}{m\omega^2} (0) \quad (2.50)$$

$$y = \frac{q}{m\omega^2} E_z \sin \omega t - \frac{q}{m\omega} E_z t \quad (2.51)$$

$$y = \frac{qE_z}{m\omega^2} [\omega t - \sin \omega t] \quad (2.52)$$

$$y = \frac{mqE_z}{m\omega q B_x} [\omega t - \sin \omega t] \quad (2.53)$$

$$y = \frac{E_z}{\omega B_x} [\omega t - \sin \omega t] \quad (2.54)$$

$$z = -\frac{q}{m\omega^2} E_y \sin \omega t - \frac{q}{m\omega^2} E_z \cos \omega t + \frac{q}{m\omega} E_y t + \frac{q}{m\omega^2} E_z \quad (2.55)$$

$$z = -\frac{q}{m\omega^2} (0) \sin \omega t - \frac{q}{m\omega^2} E_z \cos \omega t + \frac{q}{m\omega} (0)t + \frac{q}{m\omega^2} E_z \quad (2.56)$$

$$z = -\frac{q}{m\omega^2} E_z \cos \omega t + \frac{q}{m\omega^2} E_z \quad (2.57)$$

$$z = -\frac{q}{m\omega^2} E_z \cos \omega t + \frac{q}{m\omega^2} E_z \quad (2.58)$$

$$z = \frac{q}{m\omega^2} E_z - \frac{q}{m\omega^2} E_z \cos \omega t \quad (2.59)$$

$$z = \frac{q}{m\omega^2} E_z [1 - \cos \omega t] \quad (2.60)$$

$$z = \frac{qm}{m\omega q B_x} E_z [1 - \cos \omega t] \quad (2.61)$$

$$z = \frac{E_z}{\omega B_x} [1 - \cos \omega t] \quad (2.62)$$

Didapatkan Solusi analitik masing-masing komponen x , y , z untuk gerak dalam medan listrik tegak lurus dengan medan magnet yaitu.

$$x = \frac{1}{2} \frac{q}{m} E_x t^2 \quad (2.47)$$

$$y = \frac{E_z}{\omega B_x} [\omega t - \sin \omega t] \quad (2.54)$$

$$z = \frac{E_z}{\omega B_x} [1 - \cos \omega t] \quad (2.62)$$

2.3. Solusi Numerik Gerak Elektron

Persoalan yang melibatkan model matematika banyak muncul dalam berbagai disiplin ilmu pengetahuan, seperti dalam bidang fisika, kimia, ekonomi, atau pada bidang teknik. Pemahaman metode analisis dalam menyelesaikan masalah matematika yang dimodelkan dengan persamaan diferensial sangat

diperlukan. Akan tetapi, pada saat tertentu pemahan ini seringkali dihadapkan pada masalah matematika yang memerlukan perhitungan-perhitungan yang cukup panjang dan memerlukan waktu yang cukup lama (Arifin, 2011).

Pendekatan yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan metode numerik. Metode numerik adalah teknik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan matematis dengan menggunakan operasi matematika sederhana, yaitu operasi tambah, kurang, kali, bagi (Sudadi & Teguh, 2015: 1). Solusi Numerik merupakan solusi hampiran (pendekatan) sehingga selalu memiliki galat. Pemilihan metode numerik yang tepat bertujuan untuk menemukan perhitungan yang dapat membuat galat sekecil mungkin dan perhitungan menjadi efisien (Suparno, 2005: 2).

2.3.1 Metode Runge-Kutta Orde 4

Dalam metode numerik terdapat banyak metode, salah satu metode yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan gerak berupa persamaan diferensial adalah metode Runge-Kutta (Hardyanto, 2005: 119). Metode Runge Kutta adalah salah satu metode numerik mencapai ketelitian dari suatu pendekatan deret Taylor tanpa memerlukan kalkulasi turunan yang lebih tinggi (Lu, nd : 9). Metode Runge-Kutta merupakan pendekatan dari solusi deret Taylor sebagai berikut.

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y) \quad (2.63)$$

$$y(t) = \int f(t, y) dt \quad (2.64)$$

$$y_{i+1} = y_i + \int_{t_i}^{t_{i+1}} f(t, y) dt \quad (2.65)$$

$$y(t_i + h/2) = y_{i+1/2} \quad (2.66)$$

$$t_i + h/2 = t_{i+1/2} \quad (2.67)$$

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} f(t, y) dt \approx hf(t_{i+1/2}, y_{i+1/2}) + O(h^3) \quad (2.68)$$

$$y_{i+1} = y_i + hf(t_{i+1/2}, y_{i+1/2}) + O(h^3) \quad (2.69)$$

$$y_{(i+1/2)} = y_i + \frac{h}{2} \frac{dy}{dt} = y(t_i) + \frac{h}{2} f(t_i, y_i) \quad (2.70)$$

Persamaan diatas merupakan persamaan Runge-Kutta orde 2. Dikutip dari Jensen (2012: 242), Kita dapat menuliskan kembali persamaan (2.70).

$$y_{i+1} = y_i + \int_{t_i}^{t_{i+1}} f(t, y) dt \quad (2.71)$$

Menggunakan formula simpson untuk integral, deret taylor dapat kita tuliskan kembali menjadi.

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} f(t, y) dt \approx \frac{h}{6} [f(t_i, y_i) + f(t_{i+1/2}, y_{i+1/2}) + f(t_{i+1}, y_{i+1})] + O(h^5) \quad (2.72)$$

Karena deret taylor merupakan deret yang tak berhingga, maka agar praktis deret taylor dapat dipotong hingga orde tertentu saja (Tresnaningsih, 2010: 6). Pada metode Runge-Kutta orde 4, deret taylor dipotong pada orde $\sim O(h^5)$. Nilai $\sim O(h^5)$ yang disebut galat atau *error* (Tresnaningsih, 2010: 6). *Truncation error* merupakan kesalahan yang diakibatkan pemotongan pada komputasi tak berhingga agar menjadi proses berhingga (Sudadi & Teguh, 2015: 14). Sederhananya persamaan Runge-Kutta dapat dituliskan.

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{6} [f(t_i, y_i) + f(t_{i+1/2}, y_{i+1/2}) + f(t_{i+1}, y_{i+1})] + O(h^5) \quad (2.73)$$

Hasilnya adalah

$$k_1 = hf(t_i, y_i) \quad (2.74)$$

$$k_2 = hf(t_i + h/2, y_i + k_1/2) \quad (2.75)$$

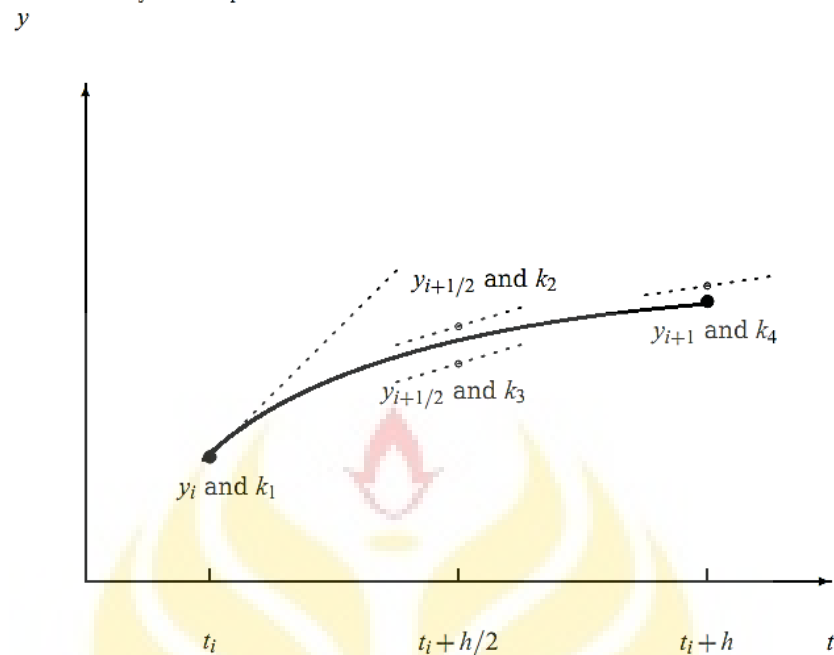
$$k_3 = hf(t_i + h/2, y_i + k_2/2) \quad (2.76)$$

$$k_4 = hf(t_i + h, y_i + k_3) \quad (2.77)$$

Dimana masing-masing nilai adalah (Christodoulou, 2009) :

1. k_1 adalah kemiringan pada awal interval.
2. k_2 adalah kemiringan pada titik tengah dari interval, gunakan kemiringan k_1 untuk menentukan nilai titik tengah dari y pada titik $t_n + h/2$ menggunakan metode Euler.
3. k_3 adalah titik tengah dari interval sama seperti nilai k_2 tetapi sekarang digunakan nilai kemiringan k_2 untuk menghitung nilai y .
4. k_4 adalah kemiringan pada akhir interval.

Dikutip dari Jensen (2012: 251), pada metode Runge-Kutta orde 4 turunan dievaluasi pada 4 titik. Yaitu 1 saat titik awal, 2 saat titik tengah dan 1 saat titik akhir. 4 Titik evaluasi ini menyebabkan *truncation error* dari metode Runge-kutta $\sim O(h^5)$ (Anagnostopoulos, 2014: 206). Penggambaran geometri dari metode Runge-Kutta dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Penggambaran geometris dari metode Runge-Kutta Orde-4 (Jensen.2012:251)

Dengan memasukkan nilai k_1, k_2, k_3, k_4 didapatkan nilai diferensialnya adalah.

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.78)$$

Semua harga k berhubungan secara rekursif. Artinya k_1 muncul dalam persamaan untuk k_2 , yang muncul lagi dalam persamaan untuk k_3 , dan seterusnya. Rekurensi ini membuat metode Runge-Kutta efisien untuk kalkulasi oleh komputer (Utami, 2005). Efisiensi ini menyebabkan metode Runge-Kutta dapat menyelesaikan persamaan diferensial dengan pertumbuhan *truncation error* yang jauh lebih kecil (Suprianto, 2006).

King (n.d) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa metode Runge-Kutta dapat digunakan untuk menggambarkan posisi dari partikel bermuatan dalam

medan elektromagnetik. Berikut algoritma Runge-kutta dalam medan magnet konstan yaitu :

$$t_{n+1} = t_n + h \quad (2.79)$$

$$x_{n+1} = x_n + \frac{k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4}{6} \quad (2.80)$$

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + \frac{2l_1 + 2l_2 + 2l_3 + 2l_4}{6} \quad (2.81)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{m_1 + 2m_2 + 2m_3 + m_4}{6} \quad (2.82)$$

$$\dot{y}_{n+1} = \dot{y}_n + \frac{p_1 + 2p_2 + 2p_3 + p_4}{6} \quad (2.83)$$

Dimana

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} \quad (2.84)$$

$$\frac{dy}{dt} = \dot{y}$$

$$\frac{d\dot{x}}{dt} = f(\dot{x}, \dot{y}) = qv_y \times B$$

$$\frac{d\dot{y}}{dt} = g(\dot{x}, \dot{y}) = -qv_x \times B$$

$$k_1 = h \times \dot{x} \quad (2.85)$$

$$l_1 = h \times \dot{y}$$

$$m_1 = h \times f(\dot{x}, \dot{y})$$

$$p_1 = h \times g(\dot{x}, \dot{y})$$

$$k_2 = h \times \left(\dot{x} + \frac{l_1}{2} \right) \quad (2.86)$$

$$m_2 = h \times \left(\dot{y} + \frac{p_1}{2} \right)$$

$$l_2 = h \times f \left(\dot{x} + \frac{l_1}{2}, \dot{y} + \frac{p_1}{2} \right)$$

$$p_2 = h \times g \left(\dot{x} + \frac{l_1}{2}, \dot{y} + \frac{p_1}{2} \right)$$

$$k_3 = h \times \left(\dot{x} + \frac{l_2}{2} \right) \quad (2.87)$$

$$m_3 = h \times \left(\dot{y} + \frac{p_2}{2} \right)$$

$$l_3 = h \times f \left(\dot{x} + \frac{l_2}{2}, \dot{y} + \frac{p_2}{2} \right)$$

$$p_3 = h \times g \left(\dot{x} + \frac{l_2}{2}, \dot{y} + \frac{p_2}{2} \right)$$

$$k_4 = h \times (\dot{x} + l_3) \quad (2.88)$$

$$m_4 = h \times (\dot{y} + p_3)$$

$$l_4 = h \times f(\dot{x} + l_3, \dot{y} + p_3)$$

$$p_4 = h \times g(\dot{x} + l_3, \dot{y} + p_3)$$

2.3.2 Metode Feynman-Newton

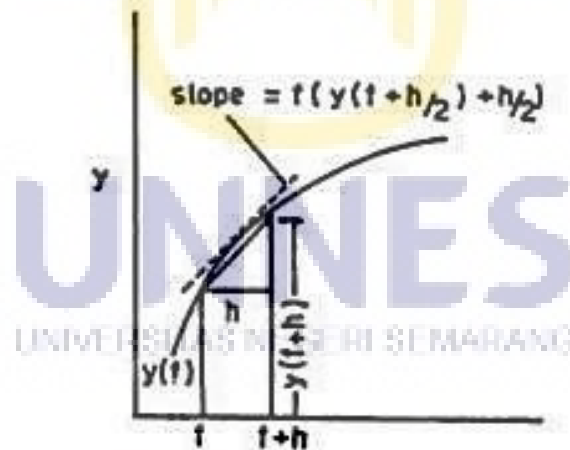
Metode Feynman-Newton juga biasa disebut metode *Half-Step Point*. Metode ini disebut metode *Half-Step* (setengah langkah) dikarenakan

menggunakan nilai setengah langkah dari langkah sebelumnya (Salafudin, 2014). Metode Feynman-Newton memiliki algoritma yang hampir sama dengan metode Runge-Kutta orde 2 (Jensen, 2012: 249). Metode Feynman-Newton merupakan perbaikan dari metode euler untuk meningkatkan akurasi dari program (Hardyanto, 2004 : 51). Berikut persamaan Feynman-Newton :

$$v_{1/2} = v_0 + \frac{h}{2} a_0$$

$$r_{n+1} = r_0 + hv \quad (2.89)$$

Metode Feynman-Newton dapat digunakan dengan catatan metode *half-step* bukan *self-starting*, yaitu persamaan (2.89) tidak memperbolehkan untuk menghitung $v^{1/2}$ secara langsung. Masalah ini dapat diatasi dengan mengadopsi algoritma Euler untuk separuh langkah pertama (Anas *et al.*, 2006).



Gambar 2.13 *Slope* Pada metode Feynman-Newton (Verma, 2007)

Gambar 2.13 menggambarkan *slope* dari metode Feynman-Newton. Pada metode Feynman-Newton, untuk mencapai $t+h$ digunakan titik tengah terlebih

dahulu. Sehingga pada gambar tampak adanya 2 slope. Yang membedakan antara metode Feynman-Newton dengan metode Euler adalah pada metode Feynman-Newton mempertimbangkan kecepatan pada pertengahan interval pada saat menghitung nilai. Metode Feynman-Newton memiliki *error* sebesar $\sim O(h^3)$ (Anagnostopoulos, 2014: 206). Sehingga lebih teliti dibandingkan metode Euler yang memiliki *error* $\sim O(h^2)$ (Anagnostopoulos, 2014: 205).

Menurut Salafudin (2014), Algoritma penyelesaian gerak Siklotron dengan metode Feynman-Newton sebagai berikut :

- (1) Mendefinisikan konstanta dan variabel awal.
- (2) Menghitung Percepatan awal.
- (3) Menghitung kecepatan setengah langkah.
- (4) Menghitung posisi menggunakan kecepatan setengah langkah.
- (5) Menghitung Da .
- (6) Menghitung nilai percepatan dengan persamaan.
- (7) Menghitung nilai kecepatan dengan persamaan.
- (8) Menghitung nilai posisi dengan persamaan.
- (9) Menghitung $t = t+h$
- (10) Mengulang langkah 5 sampai 9 hingga t_{max} .

2.4. Scratch

Bahasa pemrograman merupakan bahasa buatan yang dapat mengontrol perilaku komputer (Wahyudi, 2008). Saat ini, jutaan programmer diseluruh dunia berlomba-lomba untuk mengembangkan bahasa pemrograman yang stabil, cepat

dan berkualitas tinggi dalam ilmu komputasi (Anagnostopoulos, 2014: 1). Dalam pengembangannya, telah lahir bermacam-macam bahasa pemrograman. Diantaranya adalah *PHP, C, Fortran, Assembler* dan lain sebagainya.

Bahasa pemrograman yang telah dikembangkan umumnya terlalu rumit dan susah dipahami anak usia 10 Tahun. Dalam artikelnya yang berjudul *Scratch: Programming for all*, Resnick (2007) mengungkapkan bahwa “*Kita ingin memudahkan semua orang, Semua umur, Semua background yang tertarik untuk memprogram permainan, animasi dan simulasi*”. Hal ini yang melandasi dikembangkannya bahasa pemrograman Scratch pada tahun 2003.

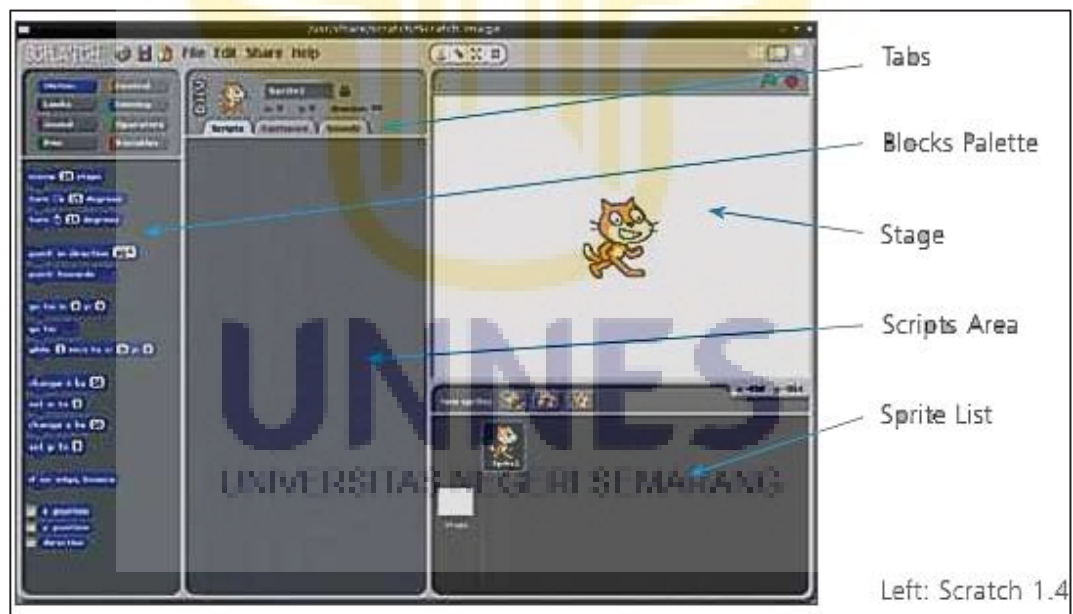
Scratch merupakan salah satu bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh Lifelong Kindergarten Group pada MIT (The Massachusetts Institute of Technology) Media Lab, Amerika Serikat. Selain diprogram secara *offline*, Scratch juga dapat diprogram secara *online* dengan cara mengakses *website Scratch* yang beralamat di <https://scratch.mit.edu/>. Saat ini Scratch menjadi komunitas online pendidikan kreatif dengan lebih dari 2 juta pendaftar dan lebih dari 4,361,284 proyek yang dibagikan (Ouahbi *et al.*, 2015).

Scratch adalah bahasa pemrograman berbasis blok – blok (Resnick, 2007). Tampilan struktur program ditampilkan dalam bentuk blok (seperti kepingan *puzzle*) dan akan memiliki makna jika *syntac* disusun secara tepat (Kordaki, 2012). Perintah terpisah seperti potongan *puzzle*, jadi peneliti bisa mengkombinasikan mereka. Perintah pada Scratch dikategorikan berdasarkan warna, jadi pengguna mudah menemukannya ketika pengguna membutuhkan.

Menurut Resnick *et al.* (2007), Scratch lebih mudah digunakan dibandingkan bahasa pemrograman lain sebab: Pengguna tidak perlu mengingat struktur perintah dan menuliskan perintah. Semua perintah ada pada *Blocks palette*, jadi hanya perlu *drag and drop* perintah pada *Script Area*. Pada Scratch jarang ditemukan pesan *error* (Maloney *et al.*, 2010: 5). Jadi ketika pengguna salah menuliskan program, program yang dituliskan akan selalu dianggap benar oleh Scratch.

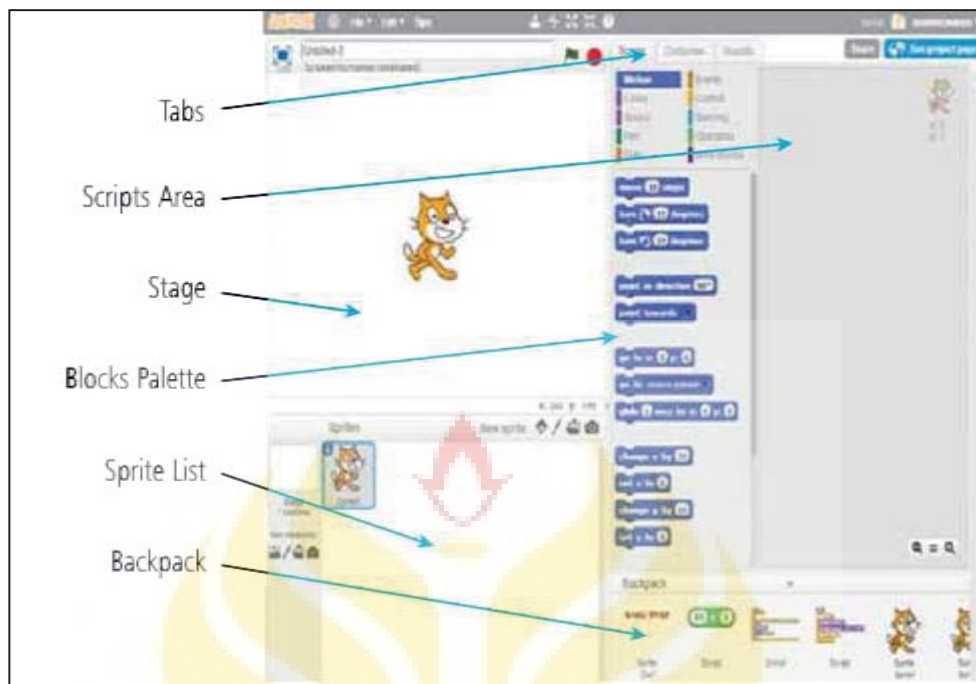
2.5. Bagian-Bagian Scratch

Scratch 1.4 memiliki tampilan awal seperti ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Tampilan *Windows* Scratch 1.4 (<http://scratch.mit.edu/crate>)

Sedangkan Scratch 2.0 memiliki tampilan awal seperti ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Tampilan *Windows* Scratch 2.0 (<http://scratch.mit.edu/create>)

Windows Scratch mempunyai bagian-bagian pokok sebagai berikut :

1. *Stage* : Terletak dikanan atas, berfungsi untuk menampilkan animasi yang telah dibuat.
2. *Sprite List* : Berfungsi menambahkan karakter yang ditampilkan pada stage.
3. *Script Area* : Tempat dimana pengembang dapat membuat program Scratch dengan cara menyunnya disini.
4. *Block Palatte* : Berfungsi untuk memberikan perintah kepada komputer.

2.6. *Blocks Pallate*





Blocks Pallate berarti tempat menyimpan *blocks-blocks* perintah Scratch sehingga memudahkan digunakan kembali. Pada Scratch 1.4 terdiri dari 8 kategori *Blocks* yang ditunjukkan Gambar 2.16 :


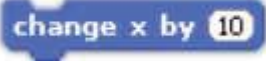
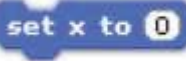


Gambar 2.16 *Blocks Pallate* pada Scratch (Armoni *et al*, 2013)

Masing-masing kategori *blocks* terdiri dari beberapa perintah. Dikutip dari Armoni *et al.* (2013: 29), berikut penjelasan dari beberapa perintah *Blocks Palatte* sebagaimana ditunjukkan Tabel 2.1 sampai Tabel 2.8.

Tabel 2. 1 Keterangan *Blocks Motion*






MOTION	
	Memindahkan Sprite maju atau mundur
	Memutar Sprite searah jarum jam
	Mengarahkan Titik Sprite dalam arah tertentu
	Memindahkan sprite ke posisi x dan y secara spesifik pada stage

	Mengerakan sprite ke posisi spesifik dalam selang waktu tertentu
	Mengubah posisi x dari sprite sesuai perhitungan yang dimasukan
	Menentukan posisi x dari sprite ke nilai yang dimasukan

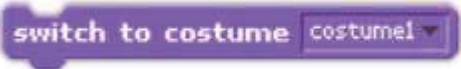

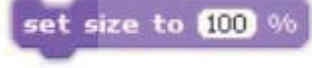

Tabel 2. 2 Keterangan *Blocks Sounds*

SOUNDS	
	Mulai memainkan Suara
	Mengatur tipe instrument yang digunakan

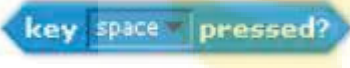


Tabel 2. 3 Keterangan *Blocks Pen*

PEN	
	Menghapus semua tulisan dan stampel dari stage
	Meletakkan Sprite Pena Kebawah
	Mengatur warna pena sesuai warna yang dipilih
	Mengubah ukuran pena sesuai nilai yang dimasukan
	Membuat stampel dari gambar sprite pada stage



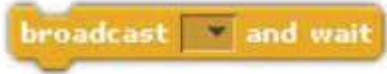
Tabel 2. 4 Keterangan *Blocks Looks*






LOOKS	
	Merubah tampilan Sprite dengan tampilan yang berbeda
	Menampilkan Percakapan Sprite sesuai waktu yang dimasukan
	Mengatur ukuran sprite sesuai persentase ukuran sebenarnya
	Membuat sprite tidak ditampilkan pada layar

Tabel 2. 5 Keterangan *Blocks Sensing*






SENSING	
	Menampilkan benar jika keyboard dipencet
	Menampilkan benar jika menyentuh warna sesuai yang dimasukan
	Melaporkan jarak dari sprite yang spesifik dengan mouse pointer

Tabel 2. 6 Keterangan *Blocks Controls*

CONTROLS	
	Menjalankan Script saat bendera hijau di klik
	Menjalankan Script saat tombol yang dipilih ditekan
	Mengirim kesemua semua sprite





	Akan menjalankan sprite ketika menerima pesan
	Melanjutkan hingga nilai yang dimasukkan
	Perintah jika
	Perintah jika dan jika tidak
	Mengulangi hingga

Tabel 2. 7 Keterangan *Blocks Numbers*

NUMBERS	
	Operator Pertambahan
	Operator Pengurangan
	Operator Perkalian
	Operator Pembagian
	Operator kurang dari nilai
	Operator sama dengan nilai
	Operator lebih dari nilai

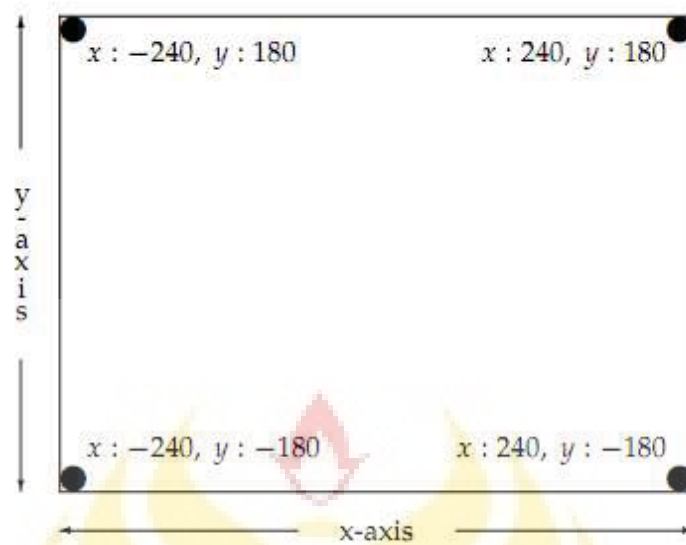
	Operator Pembulatan
---	---------------------

Tabel 2. 8 Keterangan *Blocks Variabel*

VARIABEL	
	Membuat variabel dengan nama baru
	Mengubah variabel berdasarkan nilai yang dimasukan
	Mengatur variable sesuai nilai yang dimasukan
	Menampilkan nilai dari variabel

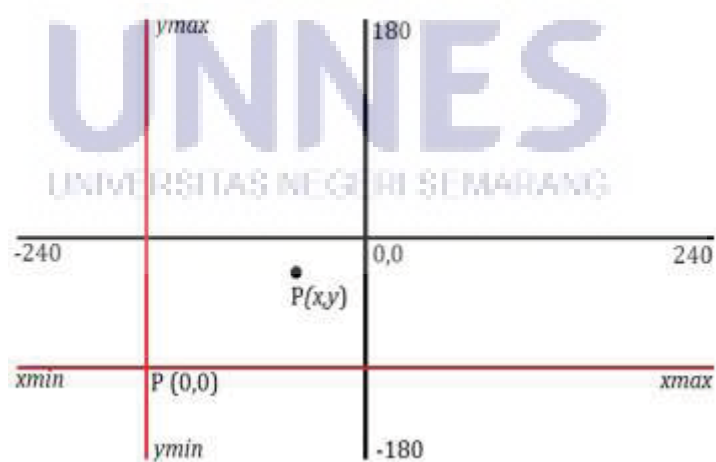
2.7. Grafik pada Scratch

Stage pada Scratch berfungsi sebagai layar untuk menampilkan program yang telah dibuat. Stage memiliki lebar 480 unit dan 360 unit (Armoni *et al*, 2013). Pusat dari stage adalah 0 untuk sumbu horizontal dan 0 untuk sumbu vertikal. Stage memiliki rentang -240 sampai 240 pada sumbu horizontal, dan 180 sampai -180 pada sumbu vertikal. Koordinat layar pada Scratch ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Posisi x dan y pada layar Scratch 1.4 (Armoni *et al*, 2013)

Untuk menggambarkan koordinat kartesian, diperlukan transformasi koordinat terlebih dahulu pada koordinat scratch (Hardyanto, 2014: 33). Hal ini disebabkan koordinat Scratch dan koordinat kartesian memiliki perbedaan. Penggambaran koordinat kartesian pada *Stage* Scratch ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.18 Penggambaran koordinat Scratch dan Koordnat Kartesian (Hardyanto, 2014:35).

Dimisalkan koordinat Scratch (P_x, P_y) dari titik p . dan koordinat kartesian (x, y) dari titik p . maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$P_x = k_1 x + k_2 \quad (2.90)$$

$$P_y = k_3 x + k_4 \quad (2.91)$$

Didapat beberapa kemungkinan untuk memperoleh solusi nilai K sebagai berikut:

- Jika $x = x_{min}$ maka $P_x = -240$
- Jika $x = x_{max}$ maka $P_x = 240$
- Jika $y = y_{min}$ maka $P_y = -180$
- Jika $y = y_{max}$ maka $P_y = 180$

Dengan mensubstitusikan 4 kemungkinan (2.1) dan (2.2), didapatkan nilai k_1, k_2, k_3, k_4 sebagai berikut :

$$k_1 = \frac{480}{x_{max} - x_{min}} \quad (2.92)$$

$$k_2 = -240 \left(\frac{2x_{min}}{(x_{min} - x_{max})} + 1 \right) \quad (2.93)$$

$$k_3 = \frac{360}{y_{max} - y_{min}} \quad (2.94)$$

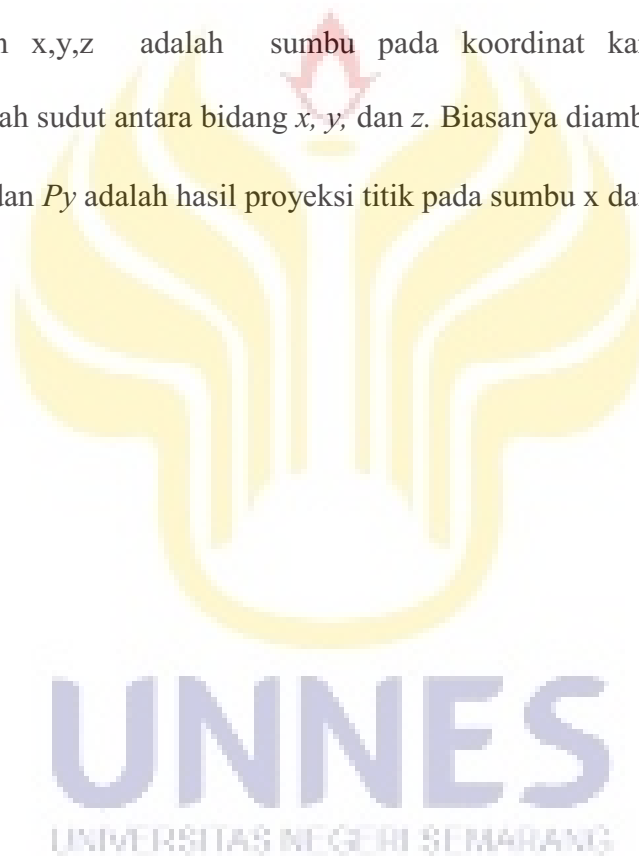
$$k_4 = -180 \left(\frac{2y_{min}}{(y_{min} - y_{max})} + 1 \right) \quad (2.95)$$

Scratch hanya dapat menggambarkan sebuah titik hanya menggunakan koordinat kartesian 2 dimensi saja dengan sumbu x dan sumbu y (Hardyanto,

2014: 159). Untuk menggambarkan gerak partikel bermuatan dalam medan magnet, diperlukan sistem koordinat 3 Dimensi, yaitu sumbu x , sumbu y , sumbu z (Salafudin, 2014). Dikutip dari Hardyanto (2014:159), persamaan untuk mendapatkan titik proyeksi 3 dimensi adalah :

$$\begin{aligned} P_x &= x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma \\ P_y &= x \sin \alpha + y \sin \beta + z \sin \gamma \end{aligned} \quad (2.96)$$

Dengan x, y, z adalah sumbu pada koordinat kartesian. Sedangkan α, β, γ adalah sudut antara bidang x, y , dan z . Biasanya diambil $0^\circ, 90^\circ$, dan 225° Dimana P_x dan P_y adalah hasil proyeksi titik pada sumbu x dan y .



BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan analisis hasil penelitian dan pembahasan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Telah dihasilkan simulasi gerak elektron dalam medan listrik dan medan magnet dengan metode numerik Runge-Kutta menggunakan *software* Scratch. Dari hasil pengujian validasi ahli aspek materi, aspek komputasi, dan aspek Rekayasa Perangkat Lunak (RPL) & tampilan, didapatkan persentase kelayakan sebesar 87.5 %. Ini menunjukkan bahwa simulasi sangat layak untuk digunakan dalam penelitian selanjutnya sebagai media pembelajaran.
2. Dengan menggunakan metode Runge-Kutta, didapatkan hasil ketelitian sebesar 99.9995 % untuk posisi elektron dalam sumbu y dan 99.98199 % untuk posisi elektron dalam sumbu z. Metode Runge-Kutta lebih teliti jika dibandingkan dengan metode Feynman-Newton yang hanya memiliki ketelitian sebesar 95.4335 % untuk posisi elektron dalam sumbu y dan 47.6315 % untuk posisi elektron dalam sumbu z.

5.2. Saran

Untuk pengembangan selanjutnya, dapat dilakukan kajian lebih lanjut mengenai simulasi partikel bermuatan dalam kasus medan magnet luar tidak konstan dengan menggunakan perangkat lunak yang lebih baik. Selain itu juga perlu dilakukan kajian lebih lanjut mengenai pemanfaatan simulasi gerak partikel bermuatan dalam medan listrik dan magnet pada pemahaman konsep listrik magnet.



DAFTAR PUSTAKA

- Anagnostopoulos, K. N. 2014. *Computational Physics*. Athens: National Technical University of Athens.
- Anas, A., W. Hardyanto, & I. Akhlis. 2006. *Pengembangan Program VRML (Virtual Reality Modelling Language) untuk E-Learning Berbasis web terintegrasi dalam PHP-MySQL Mata Kuliah Ilmu Pengetahuan Bumi dan Antariksa Pokok Bahasan Sistem Tata Surya*. Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia vol 4 No 2, Juli 2006.
- Anidu, A.O., S.A. Arekete., A.O. Adedayo., & A.O. Adekoya. 2015. Dynamic Computation of Runge-Kutta's Fourth-Order Algorithm for First and Second Order Ordinary Differential Equation Using Java. *International Journal of Computer Science (IJCS)*. vol 12, May 2015.
- Arifin, M., & Tulus. 2011. *Metode Runge-Kutta Ordo-2 pada Penyelesaian Rangkaian Listrik RLC*. Medan: Departemen Matematika-Fakultas MIPA Universitas Sumatera Utara.
- Armoni, M., & M. Ben-Ari. 2013. *Computer Science Concepts in Scratch(Scratch 1.4)*. California: Weizmann Institute of Science.
- Azam, M., T. Kusbramanto & J.E. Suseno. 2007. *Simulasi Gerak Partikel Bermuatan Dalam Pengaruh Medan Listrik dan Induksi Magnet menggunakan MATLAB Versi 7.1*. Semarang: Lab Fisika atom dan inti, Fisika FMIPA UNDIP.
- Bittencourt, J.A. 2004. *Fundamental of Plasma Physics*.tersedia di <http://springer.com/978-0-387-20975-3> [diakses 10-9-2016].
- Christodoulou, N. S. 2009. *An Algorithm Using Runge- Kutta Methods Of Orders 4 And 5 For Systems Of ODEs*. International Journal of Numerical Methods and Applications: Vol 2 No 1 2009.
- Freidberg, J.P. 2012. *Plasma Physics and Fusion Energy*. Cambridge University Press.
- Griffith, D. J. 1999. *Introduction to Electrodynamics*. Prentice Hall : New Jersey

- Hardyanto, W. 2014. *Kajian Gejala Fisika dengan Scratch*. Semarang: Program Pascasarjan Universitas Negeri Semarang.
- Hardyanto, W. 2005. *Mengungkap Fenomena Fisika dengan Delphi*: Unnes Press.
- Hermanto, A. 2012. *Perhitungan Ralat Komputasi Gerak Benda Relativistik dalam Medium Penghambat dengan Metode Deret Taylor dan Bahasa UBASIC*. Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVI HFI Jateng & DIY. April 2012. ISSN : 0853-0823.
- Irawan, D, S.N. Khotimah & S. Viridi. 2011. *Pemodelan Gerak Elektron dalam Pengaruh Medan Magnet Konstan Menggunakan Metode Euler dengan Korektor Normalisasi Laju*. Simposium Nasional Inovasi Pembelajaran dan Sains: Bandung.
- Jensen, M. H.. 2012. *Computational Physics - Lecture Notes Fall 2012*. University of Oslo: Norway.
- Karolcik, S., E. Cipkova, R. Hrusecky, & M. Veselsky. 2015. *The Comprehensive Evaluation of Electronic Learning Tools and Education Software (CEELTES)*. Departement of Didactics in Science, Faculty of Natural Science, Comenius University in Britslavia: Slovakia.
- King, N.J. n.d. *CO54: Motion of a Charged Particle in E-M Field*. The Queen's Collage.
- Kordaki, M.. 2012. *Diverse categories of programming learning activities could be performed within Scratch*. University of the Aegean, University Hill: Greece.
- Longair, M.. 2003. *Theoretical Concepts in Physics*. University of Cambridge: Cambridge University Press.
- Lu, Y.Y.. n.d. *Numerical Methods for Differential Equations*. Department of Mathematics City University of Hong Kong. Kowloon, Hong Kong.
- Maloney, J., M. Resnick., N. Rusk., B. Silverman, & E. Eastmond. 2010. *The scratch programming language and environment*. ACM Trans. Comput. Educ. 10, 4, Article 16 (November 2010).

- Moisan, M. & Pelletier, J. 2012. *Physics of Collisional Plasmas*. Tersedia di <http://springer.com/978-94-007-4557-5> [diakses 10-9-2016].
- Nugraha, M.I.. 2015. *Efektifitas Media Interaktif Berbasis Scratch pada Pembelajaran Biologi Materi Sel di SMA Teuku Umar Semarang*. Skripsi. Semarang: Jurusan Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.
- Nuraenafisah. 2012. *Pengaruh Penggunaan Scratch Terhadap Kreativitas Berpikir Matematis*. Skripsi. Cirebon: Jurusan Tadris Matematika-Fakultas Tarbiyah Institut Agama Islam Negeri Syekh Nurjati Cirebon.
- Oberkampf, W.L., T.G. Trucano. 2002. *Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics*. Sandia National Laboratories: Albuquerque, New Mexico.
- Ouhbi, I., F. Kaddari, H. Derhmaoui, A. Elachqar, & S. Lahmine. .2014. *Learning Basic Programming Concepts By Creating Games With Scratch Programming Environment*. Sidi Mohamed Ben Abdellah University - Faculty of Science Dhar El Mahraz: Morocco.
- Resnick, M.. 2007. *Scratch Programming*. MIT Media Lab.
- Salafudin, A. & W. Hardyanto. 2014. *Pengembangan Media Visualisasi Tiga Dimensi berbasis Scratch Materi Listrik Magnet*. Artikel Skripsi. Semarang: Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.
- Serway, R.A. & J.W. Jewett. 2004. *Physics for Scientists and Engineers*. American: Thomson Brooks/Cole.
- Sudiadi & R. Teguh. 2015. *Metode Numerik*. Palembang: STMIK Global Informatika MDP.
- Sugiyono. 2012. *Metode penelitian Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Suharsimi, A. 2009. *Dasar - Dasar Evaluasi Pendidikan*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Suparno, S.. 2008. *Komputasi untuk Sains dan Teknik -Dalam Matlab-* . Departemen

- Fisika-FMIPA, Universitas Indonesia.
- Supriyanto. 2006. *Runge-Kutta Orde Empat*. Lab. Komputer, Departemen Fisika, Universitas Indonesia.
- Surendranath, B. nd. *Charge in Electric and Magnetic Fields*. Tersedia di <http://youtube.com/watch?v=0NaC8iMEh1Q> [diakses 10-11-2016].
- Tay, K.G., T.H. Cheong, M.F. Lee, S.L. Kek, & R.A. Kahar. 2015. *A Fourth-order Runge-Kutta (RK4) spreadsheet calculator For Solving A System of Two First-Order Ordinary Differential Equations Using Visual Basic (VBA) Programing*. Spreadsheets in Education (eJSiE) volume 8 Issue 1.
- Tippler, P.A. 2001. *Fisika untuk Sains dan Teknik*. Jakarta: Erlangga.
- Tresnaningsih, R.. 2010. *Modul Mata Kuliah Analisis Numerik*. Medan: Prodi Pendidikan Matematika IKIP PGRI Medan.
- Utami, R. P.. 2005. *Metode Runge-Kutta untuk solusi Persamaan Pendulum*. Skripsi. Semarang: Jurusan Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.
- Vaca-C., & L. Azucena. 2015. *Coding with Scratch: The design of an educational setting for Elementary pre-service teachers*. Proceedings of 2015 International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL): Florence, Italy.
- Verma, R.C., P.K. Ahluwalia, & K.C. Sharma. 2007. *Computational Physics an Introduction*. New International Publisher.
- Wahono, R.S. 2006. *Aspek dan Kriteria Penilaian Media Pembelajaran*. Tersedia di <http://romisatriawahono.net/2006/06/21/aspek-dan-kriteria-penilaian-media-pembelajaran/> [diakses 02-11-2016].
- Wahyudi, B. 2008. *Konsep Sistem Informasi dari BIT sampai Database*. Yogyakarta: ANDI.
- Zarlis, M. 2007. *Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar Tetap dalam Bidang Ilmu Fisika Komputasi*. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- <http://scratch.mit.edu/about> [diakses 5-5-2016].