

TUGAS AKHIR

MEMBEDAKAN JET QUARK DAN GLUON DALAM TUMBUKAN ANTAR PROTON DENGAN MENGGUNAKAN *MACHINE LEARNING*



Dini Widiana

NPM: 2015720008

PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INFORMASI DAN SAINS
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
2019

FINAL PROJECT

**QUARK AND GLUON JETS DISCRIMINATION IN
PROTON-PROTON COLLISIONS USING MACHINE
LEARNING**



Dini Widiana

NPM: 2015720008

**DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY AND SCIENCES
PARAHYANGAN CATHOLIC UNIVERSITY
2019**

LEMBAR PENGESAHAN

MEMBEDAKAN JET QUARK DAN GLUON DALAM TUMBUKAN ANTAR PROTON DENGAN MENGGUNAKAN *MACHINE LEARNING*

Dini Widiana

NPM: 2015720008

Bandung, 17 Juli 2019

Menyetujui,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping

Aloysius Rusli, Ph.D.

Reinard Primulando, Ph.D.

Ketua Tim Penguji

Anggota Tim Penguji

Janto Vincent Sulungbudi, S.Si.

Reinard Primulando, Ph.D.

Mengetahui,

Ketua Program Studi

Philips Nicolas Gunawidjaja, Ph.D.

PERNYATAAN

Dengan ini saya yang bertandatangan di bawah ini menyatakan bahwa tugas akhir dengan judul:

MEMBEDAKAN JET QUARK DAN GLUON DALAM TUMBUKAN ANTAR PROTON DENGAN MENGGUNAKAN *MACHINE LEARNING*

adalah benar-benar karya saya sendiri, dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika keilmuan yang berlaku dalam masyarakat keilmuan.

Atas pernyataan ini, saya siap menanggung segala risiko dan sanksi yang dijatuhkan kepada saya, apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam karya saya, atau jika ada tuntutan formal atau non-formal dari pihak lain berkaitan dengan keaslian karya saya ini.

Dinyatakan di Bandung,
Tanggal 17 Juli 2019

Meterai Rp. 6000

Dini Widiana
NPM: 2015720008

ABSTRAK

Quark dan gluon merupakan partikel elementer yang berinteraksi kuat. Quark dan gluon dihasilkan di *Large Hadron Collider* (LHC) dengan menumbukkan sejumlah proton. Di LHC, proton-proton ditumbukkan dengan energi mencapai 6.5 TeV untuk masing-masing proton. Energi tersebut dapat memecah ikatan quark di dalam proton. Namun, karena adanya *color confinement* dan *asymptotic freedom* di *Quantum Chromodynamics* (QCD), maka quark-quark tersebut tidak dapat ditemukan bebas di alam. QCD juga mampu membagi hadron menjadi meson dan baryon berdasarkan komponen penyusunnya. Hadron inilah yang nantinya terbentuk dari hasil tumbukan antarproton di LHC dan terdeteksi di detektor *Compact Muon Solenoid* (CMS). Kalorimeter di detektor CMS terbagi menjadi dua, yaitu ECAL dan HCAL. Karena quark dan gluon keduanya terdeteksi di HCAL, maka sulit untuk membedakan partikel mana saja yang terhadronisasi dari quark dan gluon. Pada tugas akhir ini, digunakan dua metode *neural network* berbeda yaitu *shallow network* dan *Convolutional Neural Network* (CNN). Selain itu, hasil perbandingan dari kedua metode tersebut juga dibahas pada tugas akhir ini. Dari kedua metode tersebut, CNN memiliki hasil terbaik dalam membedakan quark dan gluon.

Kata-kata kunci: Quark, Gluon, Interaksi Kuat, *Large Hadron Collider*, *Compact Muon Solenoid*, *Shallow Network*, *Convolutional Neural Network*

ABSTRACT

Quarks and gluons are elementary particles that experience strong interaction. They form when protons are collided at the Large Hadron Collider (LHC). At the LHC, protons are crushed with total energy reaching 6.5 TeV per beam and are recorded by the Compact Muon Solenoid (CMS) detector. This energy can break the quark bonds inside the proton. However, there are two important properties of Quantum Chromodynamics (QCD), namely color confinement and asymptotic freedom. As a result, both of quarks and gluons are never directly observed as free particles in nature. QCD was successfully conceived to simplify the theory of hadron. CMS detectors observed the hadrons produced by the proton collisions. Here are two types of calorimeters: ECAL and HCAL. It is difficult to distinguish hadrons seeded from quarks or gluons, because looks identical in HCAL. In this final project, two different neural networks are presented, shallow network and Convolutional Neural Network (CNN). Their comparative performance in quark/gluon discrimination were discussed. The results show that CNN method is better to distinguish quarks dan gluons hadronization.

Keywords: Quark, Gluon, Strong Interaction, Large Hadron Collider, Compact Muon Solenoid, Shallow Network, Convolutional Neural Network

Tugas akhir ini penulis persembahkan untuk diri sendiri, kedua orang tua, kakak, adik, dan orang-orang yang dikasihi penulis

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena atas rahmat dan ijin-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul "Membedakan Jet Quark dan Gluon dalam Tumbukan Antar Proton dengan Menggunakan *Machine Learning*" tepat pada waktunya. Selama empat tahun penulis berkuliah di Fisika Universitas Katolik Parahyangan, banyak ilmu dan pengalaman berharga yang penulis dapatkan. Penulis menyadari dalam penyusunan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak yang telah memberikan bimbingan dan arahan yang berguna bagi penulisan ini. Oleh sebab itu, dengan segala ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Pak Aloysius Rusli selaku dosen pembimbing utama atas waktu yang telah disediakan oleh beliau untuk berdiskusi dan membimbing penulis mengenai penyusunan tugas akhir ini.
2. Pak Reinard Primulando selaku dosen pembimbing serta sekaligus penguji yang telah menyumbangkan ide, mengingatkan, dan membimbing penulis dengan penuh kesabaran hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Pak Philips N. G. selaku ketua program studi Fisika UNPAR dan dosen yang telah membantu dan mengajarkan penulis.
4. Pak Janto V. Sulungbudi selaku penguji sekaligus dosen favorit penulis. Terimakasih atas bantuan, hiburan, nasihat, kesempatan, dan kepercayaan yang telah beliau berikan kepada penulis sehingga penulis bisa berkembang seperti sekarang.
5. Pak Paulus C. Tjiang selaku dosen wali yang telah memberikan nasihat dan telah membimbing penulis.
6. Dosen Fisika UNPAR: Bu Sylvi, Bu Flaviana, Bu Risti, Bu Elok, Pak Kian Ming, dan Pak Haryanto selaku dosen yang telah mengajarkan banyak hal kepada penulis.
7. Staf TU beserta karyawan FTIS UNPAR yang telah membantu penulis.
8. Teman-teman Fisika UNPAR, Bengkel Sains UNPAR, dan teman-teman nongkrong laboran yang selalu membantu dan menyemangati penulis.
9. Teman-teman Fisika UNPAR angkatan 2015, yaitu Rayza, Octhree, Julia, Darren, Steven, Vega, Dirga, Clara, Stevanus, Andi, Amira, dan Nadya yang telah memberikan dukungan dan berjuang bersama penulis.
10. Bu Vero dan Pak Felix yang telah membantu, menghibur, dan memberikan dukungannya kepada penulis. Terimakasih atas bantuannya selama ini hingga penulis dapat bertahan dan berada di tahap ini.
11. Teman-teman penulis, Devia, Ajeng, Hartiwi, Wiwit, Peni, dan Citra yang telah meluangkan waktunya untuk mendengarkan keluh kesah penulis serta telah menyemangati penulis.
12. Keluarga penulis, Mamah, Papa, Kakak penulis Diki, dan Adik penulis Rizki yang telah mendoakan penulis, memberikan bantuan, nasehat, dorongan, menyemangati, dan menghibur penulis dikala jenuh.

Akhir kata penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca. Karena masih banyak kekurangan yang terdapat pada tugas akhir ini, kritik dan saran akan penulis terima demi kesempurnaan dari tulisan ini.

Bandung, Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Sistematika Pembahasan	5
2 LANDASAN TEORI	7
2.1 Teori Fisika Partikel	7
2.1.1 <i>Large Hadron Collider</i> (LHC)	7
2.1.2 <i>Compact Muon Solenoid</i> (CMS)	8
2.1.3 Model Standar	9
2.1.4 Quark dan Interaksi Kuat	9
2.2 <i>Machine Learning</i>	12
2.2.1 <i>Artificial Neural Network</i> (ANN)	12
2.2.2 <i>Shallow Neural Network</i>	16
2.2.3 <i>Convolutional Neural Network</i> (CNN)	17
3 METODE	23
3.1 <i>Shallow Network</i>	24
3.1.1 Proses Pembuatan Data	24
3.1.2 Proses Pengolahan Data	25
3.2 <i>Convolutional Neural Network</i>	27
3.2.1 Proses Pembuatan Data	27
3.2.2 Proses Pengolahan Data	27
4 HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Uji Validasi dengan menggunakan metode <i>Shallow Network</i>	31
4.2 Uji Validasi dengan menggunakan metode <i>Convolutional Neural Network</i> (CNN)	32
4.3 Perbandingan Hasil antara <i>shallow network</i> dan CNN	34
5 KESIMPULAN DAN SARAN	35
DAFTAR REFERENSI	37
A CONTOH DATA	39

B KODE PROGRAM UNTUK <i>Shallow Network</i>	41
C KODE PROGRAM UNTUK <i>Convolutional Neural Network (CNN)</i>	43

DAFTAR GAMBAR

1.1	Struktur materi di alam semesta.	2
1.2	Dua buah <i>up</i> quark dan satu buah <i>down</i> quark.	2
1.3	Dua buah <i>down quark</i> dan satu buah <i>up quark</i> membentuk sebuah neutron.	2
1.4	Partikel yang terbentuk dari hadronisasi gluon dari simulasi PYTHIA.	4
1.5	Partikel yang terbentuk dari hadronisasi quark dari simulasi PYTHIA.	4
2.1	Denah <i>Large Hadron Collider</i> (LHC).	7
2.2	Struktur <i>Compact Muon Solenoid</i> (CMS).	8
2.3	Partikel elementer yang tergabung dalam Model Standar.	9
2.4	Diagram Feynman untuk peluruhan quark.	10
2.5	Diagram Feynman untuk interaksi gluon dengan gluon.	10
2.6	Pertukaran gluon di dalam nukleon.	11
2.7	Quark dan antiquark di dalam meson tidak dapat dipisahkan meskipun telah diberikan sejumlah energi.	11
2.8	Jaringan syaraf tiruan dengan tiga lapisan tersembunyi.	12
2.9	Jaringan syaraf tiruan.	13
2.10	Proses <i>training</i> dalam <i>neural network</i>	14
2.11	Visualisasi dari kemungkinan nilai dari dua buah bobot dengan <i>loss</i> nya.	15
2.12	Perbandingan fungsi aktivasi sigmoid dengan ReLU.	16
2.13	Arsitektur jaringan dari <i>shallow neural network</i> dengan dua lapisan tersembunyi.	17
2.14	Skema umum dari <i>Convolutional Neural Network</i> (CNN).	17
2.15	Konvolusi dari gambar berukuran 5×5 dengan <i>filter</i> berukuran 3×3	18
2.16	<i>Maxpooling</i> berukuran 2×2	18
2.17	Proses mendatarkan data setelah di <i>maxpooling</i>	19
2.18	Proses menghubungkan data ke ANN.	19
2.19	Visualisasi dari angka 3 yang berbeda-beda.	20
2.20	Arsitektur jaringan CNN dalam membedakan gambar tulisan tangan pada MNIST <i>dataset</i>	21
2.21	Grafik <i>epoch</i> terhadap <i>loss</i> dari dataset MNIST.	22
2.22	Contoh data yang mengalami <i>overfitting</i>	22
3.1	Ilustrasi data yang terekam di detektor CMS.	23
3.2	Proses mendatarkan matriks.	24
3.3	Alur pembuatan data <i>training</i> dengan menggunakan metode <i>shallow network</i>	25
3.4	Arsitektur jaringan <i>shallow network</i> untuk membedakan quark dan gluon.	26
3.5	Arsitektur jaringan CNN. Bagian kiri merupakan <i>feature map</i> dan bagian kanan merupakan <i>dense layer</i>	28
4.1	Grafik akurasi terhadap <i>epoch</i> dari model <i>shallow network</i>	31
4.2	Grafik <i>loss</i> terhadap <i>epoch</i> dari model <i>shallow network</i>	32
4.3	Grafik akurasi terhadap <i>epoch</i> dari model CNN.	33
4.4	Grafik <i>loss</i> terhadap <i>epoch</i> dari model CNN.	33

DAFTAR TABEL

1.1	Gaya-gaya fundamental di Alam Semesta.	3
A.1	Potongan data yang terekam oleh detektor CMS pada satu kali <i>event</i> atau satu kali tumbukan.	40

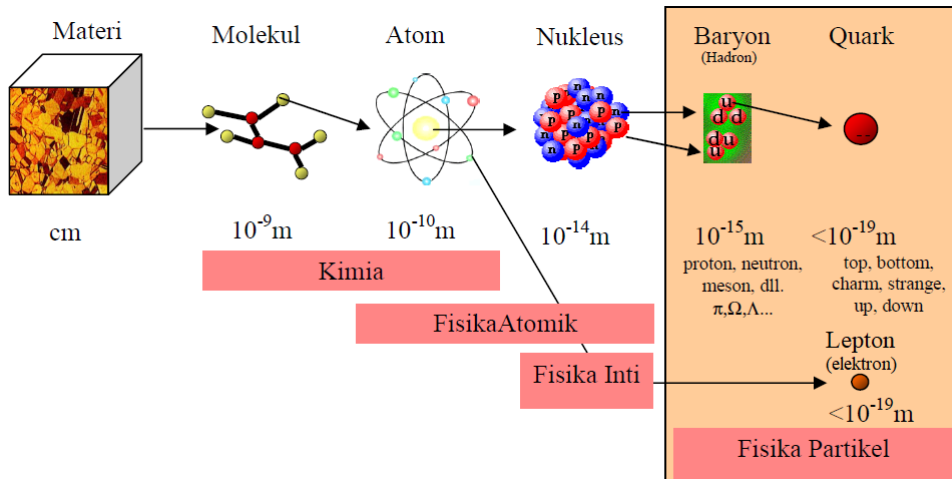
BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

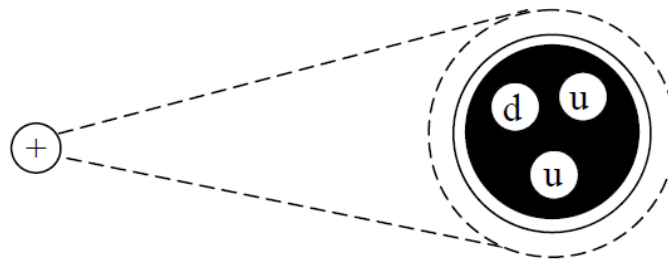
Fisika merupakan cabang ilmu pengetahuan yang mengkaji mengenai alam. Hal-hal yang makroskopik hingga mikroskopik dikaji dalam fisika. Fisika partikel elementer merupakan cabang ilmu fisika yang mengkaji bagian-bagian atomik dan sub atomik di alam.

Atom sudah diprediksikan sejak era Democritus, menurutnya materi disusun oleh partikel yang tidak dapat dibagi lagi yang selanjutnya disebut dengan atom. Atom berasal dari kata Yunani "atomos", yang berarti "tidak dapat dipotong" atau "tidak dapat dibagi". Seiring dengan berkembangnya zaman, banyak eksperimen-eksperimen yang menunjukkan bahwa atom merupakan struktur yang rumit yang dibangun oleh partikel-partikel penyusun atom. Partikel sub atomik pertama diperkenalkan oleh J.J. Thomson. Pada tahun 1897, Thomson melakukan percobaan dengan menggunakan sebuah tabung yang dapat menghasilkan sinar katoda. Pada percobaan tersebut, Thomson mampu menemukan unsur pokok dari seluruh atom yang kini dikenal sebagai elektron. Selain itu, Thomson juga mampu mengukur nilai perbandingan massa dengan muatan listriknya. Karena setiap atom memiliki elektron yang bermuatan negatif, maka harus ada partikel lain yang bermuatan positif agar atom tetap bermuatan netral. Berdasarkan penemuan ini, Thomson mengajukan sebuah model atom untuk menjelaskan hasil-hasil eksperimen dan prediksinya dengan nama model kue kismis. Pada tahun 1911, model atom Thomson dibantahkan oleh model atom yang diajukan oleh Rutherford. Rutherford menggunakan seberkas partikel alfa (α) yang ditembakkan melalui celah pelat timbal sebelum akhirnya menumbuk lempeng emas. Rutherford mengamati bahwa sebagian besar partikel α lewat tanpa mengalami pembelokan, sebagian kecil partikel α dibelokkan, dan sedikit partikel α yang dipantulkan kembali. Rutherford menyimpulkan bahwa partikel alfa yang terpantul balik terjadi karena mengenai sesuatu yang disebut sebagai inti atom (nukleus). Rutherford menyimpulkan nukleus ini adalah partikel proton dan harus bermuatan positif untuk mengimbangi muatan negatif elektron, sehingga muatan total atom adalah netral. Setelah ditemukannya elektron, proton, dan nukleus, James Chadwick menemukan neutron sebagai bagian dari nukleus pada tahun 1932 [1]. Penemuan neutron merupakan akhir dari periode klasik di fisika partikel elementer. Beberapa tahun kemudian, ditemukan berbagai partikel baru, seperti meson oleh Yukawa, antipartikel (positron/ e^+) oleh Dirac, neutrino (ν) oleh Pauli, dan quark oleh Gell-Mann. Pada tahun 1964, Gell-Mann dan Zweig mengusulkan bahwa seluruh hadron disusun atas komponen elementer yang dikenal sebagai quark. Teori mengenai partikel-partikel elementer ini disempurnakan oleh Glashow, Weinberg, dan Salam. Mereka mampu menggambarkan hampir seluruh interaksi yang terdapat pada fisika partikel. Teori tersebut dikenal sebagai Model Standar. Hingga kini Model Standar dianggap sebagai teori paling mutakhir yang digunakan oleh fisikawan-fisikawan untuk menjelaskan interaksi dari partikel-partikel elementer.

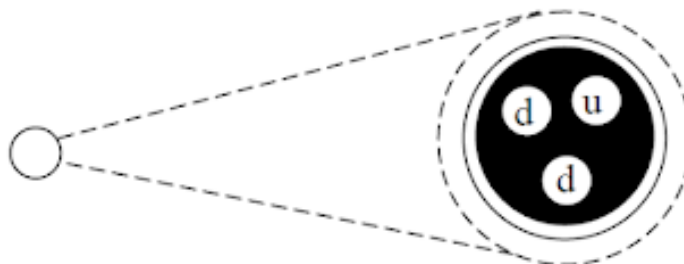


Gambar 1.1: Struktur materi di alam semesta. Partikel-partikel yang termasuk kedalam lepton, yaitu e^- , μ , τ , ν_e , ν_μ , ν_τ . [1] [2]

Gambar 1.1 menjelaskan mengenai komponen-komponen penyusun materi di alam. Komponen fundamental penyusun materi adalah quark dan lepton. Dengan berkembangnya teknologi, banyak partikel-partikel berenergi tinggi yang ditemukan. Kini, neutron dan proton tidak dianggap sebagai partikel yang fundamental karena proton dan neutron tersusun oleh quark-quark. Gambar 1.2 dan 1.3 merupakan gambar proton dan neutron yang tersusun dari quark uud dan ddu . Quark-quark yang membentuk sebuah hadron diikat melalui sebuah gaya inti yang dinamakan gaya kuat (*strong force*). Quark mengalami interaksi kuat karena memiliki muatan warna. Muatan warna ini analog dengan warna primer R, G, B dengan $\bar{R}, \bar{G}, \bar{B}$ merupakan anti muatan warnanya.



Gambar 1.2:
Dua buah *up* quark dan satu buah *down* quark. [2]



Gambar 1.3: Dua buah *down quark* dan satu buah *up quark* membentuk sebuah neutron. [2]

Di alam semesta, quark selalu membentuk sebuah hadron dengan muatan warna yang netral. Ada tiga kombinasi agar muatan warnanya menjadi netral, yaitu penggabungan muatan warna

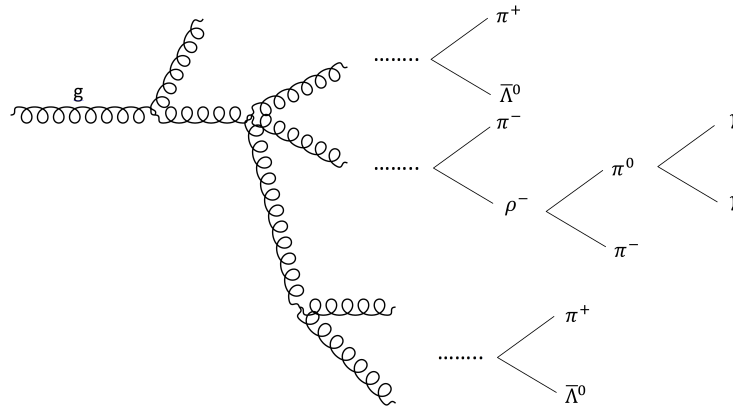
menjadi RGB, \overline{RGB} , dan penggabungan sepasang muatan warna dengan anti muatan warnanya, contohnya $R\overline{R}$. Hal ini terjadi karena adanya *color confinement* yang menyebabkan quark selalu membentuk suatu hadron. Berdasarkan jumlah quark dan kombinasi muatan warnanya, hadron terbagi menjadi dua, yaitu meson dan baryon. Proton (p) merupakan salah satu contoh dari baryon, sedangkan pion (π) merupakan salah satu contoh dari meson. Untuk dapat memecah ikatan quark dalam hadron dibutuhkan energi yang sangat besar. Di LHC, proton dan proton ditumbukkan dengan energi total sebesar 13 TeV. Energi ini mampu memecah ikatan quark dan gluon di dalam proton. Karena adanya *color confinement*, quark dan gluon harus membentuk hadron. Sehingga tumbukan antar proton dengan energi tinggi dapat menciptakan hadron-hadron baru.

Tabel 1.1: Gaya-gaya fundamental di Alam Semesta. [1]

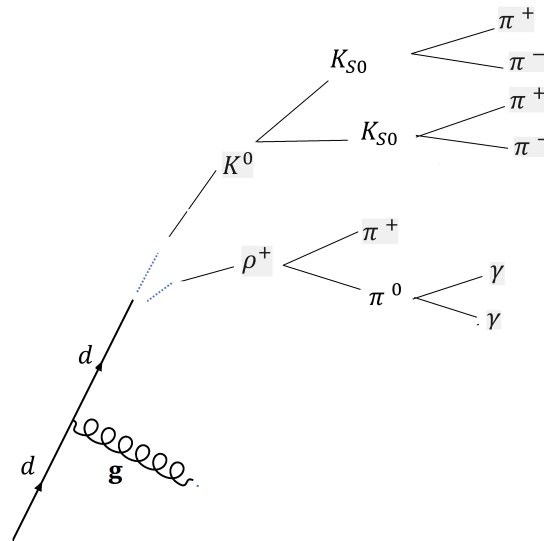
Gaya	Kekuatan	Teori	Perantara
Kuat	10	<i>Chromodynamics</i>	Gluon
<i>Electrodynamics</i>	10^{-2}	<i>Electrodynamics</i>	Foton
Lemah	10^{-13}	<i>Flavordynamics</i>	W^\pm dan Z^0
Gravitasi	10^{-42}	<i>Geometrodynamics</i>	Graviton

Tabel 1.1 menjelaskan mengenai empat bentuk interaksi fundamental yang bertanggung jawab terhadap berbagai macam interaksi antarpartikel di alam semesta. Konsep interaksi ini digunakan untuk menyatakan hubungan timbal-balik antara objek-objek yang ditinjau sehingga hubungan antar objek materi dapat dianalisa. Keempat interaksi fundamental tersebut yaitu, interaksi kuat, interaksi elektrodinamika, interaksi lemah, dan interaksi gravitasi. Namun, Model Standar hanya mampu menjelaskan tiga dari empat interaksi fundamental yang ada di alam. Interaksi gravitasi tidak dijelaskan di Model Standar.

Pada pertengahan abad ke-20, dibangun suatu penumbuk partikel terbesar di dunia yang diberi nama *Large Hadron Collider* (LHC). LHC memiliki empat buah detektor yaitu, *Compact Muon Solenoid* (CMS), ATLAS, *A Large Ion Collider Experiment* (ALICE), dan *Large Hadron Collider beauty* (LHCb) [3]. Pada tugas akhir ini, detektor yang dibahas adalah detektor CMS. Detektor ini mendeteksi data-data yang dihasilkan dari tumbukan antarproton. Energi tinggi yang digunakan pada tumbukan antarproton dapat memecah ikatan quark dan gluon. Akibatnya partikel-partikel hadronik baru akan terbentuk. Berdasarkan komponen penyusunnya, partikel-partikel ini terbagi menjadi dua, yaitu partikel yang terhadronisasi dari quark dan partikel yang terhadronisasi dari gluon. Gambar 1.4 dan Gambar 1.5 merupakan visualisasi dari simulasi tumbukan antarproton dengan menggunakan PYTHIA. PYTHIA merupakan sebuah program yang digunakan untuk menggenerasi kejadian dari tumbukan partikel yang berenergi tinggi [4].



Gambar 1.4: Partikel yang terbentuk dari hadronisasi gluon dari simulasi PYTHIA.



Gambar 1.5: Partikel yang terbentuk dari hadronisasi quark dari simulasi PYTHIA.

Pada kedua gambar tersebut, terlihat bahwa adanya kemiripan dari partikel-partikel yang terdeteksi di CMS. Dari gambar tersebut quark dan gluon dapat menghasilkan beberapa partikel yang sama, contohnya γ dan π . Hal ini terjadi karena gluon yang memiliki muatan warna dapat berinteraksi dengan gluon lainnya. Berdasarkan gambar tersebut, sulit untuk membedakan partikel mana saja yang terbentuk dari quark dan gluon. Pada tugas akhir ini, hadronisasi quark dan gluon dapat dibedakan dengan menggunakan *machine learning*. *Convolutional Neural Network* (CNN) dan *shallow network* merupakan metode *machine learning* yang digunakan pada tugas akhir ini.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka perumusan masalah yang diangkat pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara mengolah data dengan menggunakan metode *Convolutional Neural Network* (CNN) dan *shallow network*?
2. Bagaimana performa yang dihasilkan dari metode *Convolutional Neural Network* (CNN) dan *shallow network*?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui cara mengolah data-data dengan menggunakan metode *Convolutional Neural Network* (CNN) dan *shallow network*.
2. Mengetahui performa yang dihasilkan dari metode *Convolutional Neural Network* (CNN) dan *shallow network*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Data-data yang digunakan merupakan data yang diperoleh dari hasil simulasi tumbukan antarproton dengan menggunakan PYTHIA.
2. Data-data yang digunakan memiliki dimensi 448×360 piksel, ukuran tersebut diambil berdasarkan asumsi dari ukuran detektor CMS.
3. Data-data yang digunakan sudah diketahui dan dipisahkan berdasarkan kelompok quark maupun kelompok gluon.
4. Proses pembelajaran dilakukan dengan menggunakan *supervised learning*.

1.5 Sistematika Pembahasan

Penulisan tugas akhir ini disusun berdasarkan sistematika penulisan sebagai berikut:

Bab 1 Pendahuluan

Bab ini menjelaskan mengenai sejarah singkat dari fisika partikel, alasan mengapa partikel yang terhadronisasi dari quark dan gluon harus dipisahkan, serta metode-metode apa saja yang digunakan untuk proses pengolahan data.

Bab 2 Landasan Teori

Bab ini menjelaskan mengenai *Large Hadron Collider* (LHC), *Compact Muon Solenoid* (CMS), Model Standar, quark dan interaksi kuat, dan *machine learning*.

Bab 3 Metode

Bab ini menjelaskan mengenai sumber data yang digunakan dan cara pengolahan data dengan menggunakan metode CNN dan *shallow network*.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Bab ini menjelaskan mengenai hasil dari proses pengolahan data dengan menggunakan metode CNN dan *shallow network*. Selain itu, pada bab ini dijelaskan pula metode yang memiliki performa terbaik antara CNN dan *shallow network*.

Bab 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisikan kesimpulan dari hasil dan pembahasan yang telah diberikan pada bab 4. Selain itu, disampaikan pula saran dari apa yang penulis kemukakan setelah mendapatkan hasil dari pengolahan data.