



- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

OPTIMALISASI PARAMETER BREIT-WIGNER UNTUK KLASIFIKASI PARTIKEL RESONANSI DENGAN *PHYSICS- INFORMED NEURAL NETWORK*

SITI KHORIAH



DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “Optimalisasi Parameter Breit-Wigner untuk Klasifikasi Partikel Resonansi dengan *Physics-Informed Neural Network*” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir skripsi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juli 2025

Siti Khoriah
G7401211002

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

ABSTRAK

SITI KHORIAH. Optimalisasi Parameter Breit-Wigner untuk Klasifikasi Partikel Resonansi dengan *Physics-Informed Neural Network*. Dibimbing oleh R. TONY IBNU SUMARYADA WIJAYA PUSPITA dan SITTI YANI.

Resonansi partikel muncul sebagai lonjakan massa invarian akibat peluruhan partikel berumur pendek. Penelitian ini bertujuan mengestimasi parameter resonansi berupa massa pusat dan lebar peluruhan menggunakan *physics-informed neural network* (PINN), sekaligus mengklasifikasikan tiga partikel resonansi, yaitu J/ψ , Y , dan Z , beserta *background*. Data berasal dari eksperimen CMS, berupa dimuon dan dielektron pada rentang massa invarian 2-110 GeV. Tahapan penelitian meliputi pra-pemrosesan, transformasi data, pendefinisian data *signal* dan *background*, estimasi parameter berbasis distribusi Breit-Wigner, serta klasifikasi partikel resonansi. Hasil menunjukkan PINN mampu memprediksi parameter dengan galat relatif $<1\%$, sesuai referensi PDG. Pada klasifikasi, PINN ($\lambda = 0,1$) mencapai akurasi tertinggi 94,21% (data latih:uji = 90:10), melampaui model *neural network* dan *random forest*. Namun, model dengan PINN membutuhkan waktu pengujian yang lebih lama karena penambahan perhitungan *physics loss*. Pengintegrasian hukum fisika yang bersesuaian dengan *dataset* pada model *machine learning* dapat meningkatkan akurasi sehingga metode ini menjadi alternatif untuk analisis data fisika partikel.

Kata kunci: Breit-Wigner, klasifikasi partikel, *machine learning*, partikel resonansi, *physics-informed neural network*

ABSTRACT

SITI KHORIAH. Optimization of Breit-Wigner Parameters for Resonance Particle Classification Using Physics-Informed Neural Networks. Supervised by R. TONY IBNU SUMARYADA WIJAYA PUSPITA and SITTI YANI.

Particle resonance is generated from invariant mass spikes due to the decay of short-lived particles. This study aims to estimate resonance parameters such as center mass and decay width using physics-informed neural network (PINN), as well as classify three resonance particles, namely J/ψ , Y , and Z , along with the background. The data comes from the CMS experiment, in the form of dimuons and dielectrons in the invariant mass range of 2-110 GeV. The research stages include data pre-processing, data transformation, defining signal and background data, Breit-Wigner distribution-based parameter estimation, and resonance particle classification. The results show that PINN is able to predict the resonance parameters with $<1\%$ relative error, as per the PDG reference. For classification, PINN ($\lambda = 0,1$) achieved the highest accuracy of 94,21% (training:testing data ratio = 90:10), outperforming neural network and random forest models. However, testing with PINN takes longer due to the additional physics loss calculation. Integration of the laws of physics that correspond to the dataset in machine learning model can improve accuracy, providing this method an alternative for particle physics data analysis.

Keywords: Breit-Wigner, machine learning, particle classification, physics-informed neural network, resonance particles



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2025
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.

OPTIMALISASI PARAMETER BREIT-WIGNER UNTUK KLASIFIKASI PARTIKEL RESONANSI DENGAN PHYSICS-INFORMED NEURAL NETWORK

SITI KHORIAH

Skripsi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana pada
Program Studi Fisika

**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tim Penguji pada Ujian Skripsi:

1. Dr.rer.nat. Hendradi Hardhienata, S.Si., M.Si.
2. Dr. Yessie Widya Sari, S.Si., M.Si.

Judul Skripsi : Optimalisasi Parameter Breit-Wigner untuk Klasifikasi Partikel Resonansi dengan *Physics-Informed Neural Network*
Nama : Siti Khoriah
NIM : G7401211002

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. R. Tony I. Sumaryada W.P., S.Si., M.Si.

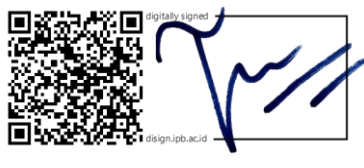


Pembimbing 2:
Dr. Sitti Yani, S.Si., M.Si.



Diketahui oleh

Ketua Departemen Fisika:
Prof. Dr. R. Tony I. Sumaryada W.P., S.Si., M.Si.
NIP. 197205191997021001



Tanggal Ujian: 17 Juli 2025

Tanggal Lulus:



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *subhanaahu wa ta'ala* atas segala dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dengan judul “Optimalisasi Parameter Breit-Wigner untuk Klasifikasi Partikel Resonansi dengan *Physics-Informed Neural Network*”. Penelitian ini telah dilaksanakan sejak bulan Januari hingga Mei 2025.

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. R. Tony Ibnu Sumaryada Wijaya Puspita, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing pertama dan Ibu Dr. Sitti Yani, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing kedua atas segala bimbingan, arahan, waktu, serta kesabaran yang telah diberikan selama proses penelitian ini berlangsung.
2. Bapak Dr.rer.nat. Hendradi Hardhienata, S.Si., M.Si. dan Ibu Dr. Yessie Widya Sari, S.Si., M.Si. selaku dosen penguji, atas segala masukan dan saran yang sangat berharga dalam penyusunan skripsi ini.
3. Ibu Siti Patimah dan Bapak Kaman Erwin, serta kedua adik tercinta (Reva dan Hotim), yang senantiasa memberikan doa, dukungan, dan kasih sayang tanpa henti, menjadi sumber semangat dalam menyelesaikan penelitian ini.
4. Bapak Prof. Dr. Akhiruddin, S.Si., M.Si. selaku dosen penggerak akademik dan seluruh dosen Departemen Fisika yang telah membagikan ilmu dan wawasan selama masa studi, serta para staf akademik yang senantiasa membantu dan memberikan informasi penting selama perkuliahan.
5. Rekan-rekan Fisika 58, Theophylis, terutama Pipit, Hasna, Iqi, Maria, Annis, Wardah, Naila, Wuri, Deas, dan Nad, atas dukungan, semangat, dan kebersamaan yang selalu menguatkan selama perjalanan akademik ini.

Penulis berharap karya ilmiah ini dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak serta turut berkontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Bogor, Juli 2025

Siti Khoriah



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	x
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Ruang Lingkup	3
II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Partikel Resonansi	4
2.2 Massa Invarian	6
2.3 Distribusi Breit-Wigner	6
2.4 <i>Machine Learning</i>	8
2.5 <i>Artificial Neural Network</i>	8
2.6 <i>Physics-Informed Neural Networks</i>	9
III METODE PENELITIAN	11
3.1 Waktu dan Tempat	11
3.2 Alat dan Bahan	11
3.3 Prosedur Penelitian	11
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	16
4.1 <i>Dataset</i>	16
4.2 <i>Data Preprocessing</i> (Pra-pemrosesan Data)	17
4.3 Pendefinisian <i>Signal</i> dan <i>Background</i>	18
4.4 <i>Data Transformation</i> (Transformasi Data)	19
4.5 <i>Feature Selection</i> (Pemilihan Fitur)	20
4.6 Model Estimasi Parameter	21
4.7 Evaluasi Parameter	22
4.8 <i>Data Splitting</i> (Pembagian Data)	24
4.9 Model Klasifikasi	25
4.10 Evaluasi Model Klasifikasi	30
IV SIMPULAN DAN SARAN	33
5.1 Simpulan	33
5.2 Saran	33
DAFTAR PUSTAKA	34
RIWAYAT HIDUP	39

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR TABEL

1.1 Ringkasan penelitian terdahulu mengenai model <i>machine learning</i>	2
4.1 Ringkasan statistik <i>dataset</i> dielektron	16
4.2 Ringkasan statistik <i>dataset</i> dimuon	17
4.3 Distribusi data <i>signal</i> dan <i>background</i>	19
4.4 Contoh hasil normalisasi pada fitur mass	20
4.5 Konstruksi model PINN estimasi parameter	21
4.6 Estimasi parameter massa dan lebar peluruhan	23
4.7 Proporsi <i>dataset</i> latih dan uji	25
4.8 Konstruksi model <i>neural network</i>	25
4.9 Konstruksi model PINN klasifikasi	27
4.10 Akurasi pengujian PINN (80:20) untuk berbagai nilai λ	28
4.11 Hasil akurasi PINN (90:10) untuk berbagai nilai λ	29
4.12 Evaluasi performa model klasifikasi	31

DAFTAR GAMBAR

2.1 Peluruhan boson Z (Aad <i>et al.</i> 2014)	5
2.2 Kurva distribusi Breit-Wigner boson Z (Ocariz 2014)	7
2.3 Arsitektur <i>artificial neural network</i> (Mishra dan Gupta 2017)	8
2.4 Perbandingan struktur (a) <i>neural network</i> konvensional dan (b) <i>physics-informed neural network</i> (Vatellis 2024)	9
3.1 Diagram alir penelitian	11
3.2 Data fitur dielektron	12
3.3 Data fitur dimuon	12
4.1 Data hasil <i>preprocessing</i>	18
4.2 <i>Feature importance</i>	20
4.3 Distribusi Breit-Wigner J/ψ : prediksi vs referensi	23
4.4 Distribusi Breit-Wigner Y : prediksi vs referensi	24
4.5 Distribusi Breit-Wigner boson Z: prediksi vs referensi	24
4.6 Grafik (a) akurasi dan (b) <i>loss</i> terhadap <i>epoch</i> NN proporsi 80:20	26
4.7 Grafik (a) akurasi dan (b) <i>loss</i> terhadap <i>epoch</i> NN proporsi 90:10	26
4.8 Grafik (a) akurasi dan (b) <i>total loss</i> terhadap <i>epoch</i> PINN (80:20)	28
4.9 Grafik komponen <i>loss</i> terhadap <i>epoch</i> PINN (80:20)	29
4.10 Grafik (a) akurasi dan (b) <i>total loss</i> terhadap <i>epoch</i> PINN (90:10)	30
4.11 Grafik komponen <i>loss</i> terhadap <i>epoch</i> PINN (90:10)	30
4.12 Kurva ROC pada skema (a) 80:20 dan (b) 90:10	32

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.