



PERBANDINGAN MODEL VQC DAN QSVM PADA SIMULASI IDEAL DAN *REAL QUANTUM HARDWARE* UNTUK KLASIFIKASI JET

ROBERT GUNANTA BUKIT



DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026



@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 “PERBANDINGAN MODEL VQC DAN QSVM PADA SIMULASI IDEAL DAN *REAL QUANTUM HARDWARE* UNTUK KLASIFIKASI JET” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apapun 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 2026

Robert Gunanta Bukit
G7401221085



ABSTRAK

ROBERT GUNANTA BUKIT. Perbandingan Model VQC dan QSVM Pada Simulasi Ideal dan *Real Quantum Hardware* Untuk Klasifikasi Jet. Dibimbing oleh TONY IBNU SUMARYADA WIJAYA PUSPITA dan SITTI YANI.

Penelitian ini mengimplementasikan dan mengevaluasi dua model *Quantum Machine Learning* untuk klasifikasi jet dari data tumbukan proton-proton 7 TeV, yaitu *Variational Quantum Classifier* (VQC) dan *Quantum Support Vector Machine* (QSVM), serta membandingkan kinerjanya pada simulasi ideal dan *real quantum hardware*. Data yang digunakan adalah *multijet primary dataset* CERN dengan 19.346 sampel data dan dua kelas jet, yang diproses melalui seleksi fitur, standarisasi, reduksi dimensi PCA tujuh komponen, dan normalisasi. VQC diuji dengan dua variasi *optimizer gradient-free* dan lima variasi ukuran *training set*, sedangkan QSVM mengadaptasi pendekatan metode *boosted* dengan algoritma SAMME untuk eksplorasi *feature map* secara adaptif. Pada simulasi ideal, VQC mencapai akurasi tertinggi 74,8% dan *boosted* QSVM mencapai 73,60%. Pada pengujian *real quantum hardware* IBM Quantum, VQC mengalami degradasi performa 23,4% pada *backend* (QPU) *ibm_fez* dan 24,2% pada *ibm_marrakesh*, sedangkan *boosted* QSVM tidak menunjukkan degradasi (0,0%) pada kedua *backend* karena dominasi estimator dengan arsitektur sirkuit dangkal. *boosted* QSVM mengungguli VQC pada kondisi simulasi maupun hardware, namun secara keseluruhan tidak ditemukan bukti *quantum advantage* pada penelitian ini, konsisten dengan keterbatasan fundamental perangkat NISQ.

Kata kunci: fisika partikel, klasifikasi jet, QSVM, NISQ, VQC

ABSTRACT

ROBERT GUNANTA BUKIT. Comparison of VQC and QSVM Models in Ideal Simulation and Real Quantum Hardware for Jet Classification. Supervised by TONY IBNU SUMARYADA WIJAYA PUSPITA and SITTI YANI.

This study implements and evaluates two Quantum Machine Learning models for jet multiplicity classification from 7 TeV proton-proton collision data, namely the Variational Quantum Classifier (VQC) and Quantum Support Vector Machine (QSVM), and compares their performance under ideal simulation and real quantum hardware conditions. The data used are the CERN multijet primary dataset consisting of 19,346 data samples and two jet classes, processed through feature selection, standardization, seven-component PCA dimensionality reduction, and normalization. VQC was evaluated using two variations of gradient-free optimizers and five variations of training set size, while QSVM adapted a boosted method approach with the SAMME algorithm for adaptive feature map exploration. Under ideal simulation, VQC achieved a highest accuracy of 74.8% and boosted QSVM achieved 75.60%. In testing on IBM Quantum real quantum hardware, VQC experienced performance degradation of 23.4% on the *ibm_fez* backend (QPU) and 24.2% on *ibm_marrakesh*, whereas boosted QSVM showed no degradation (0.0%) on both backends due to the

dominance of estimators with shallow circuit architectures. boosted QSVM outperformed VQC under both simulation and hardware conditions; however, overall, no evidence of quantum advantage was found in this study, consistent with the fundamental limitations of NISQ devices.

Keywords: jet classification, NISQ, particle physics, QSVM, VQC

@Hak cipta milik IPB University

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 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 2026
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 apa pun tanpa izin IPB.



PERBANDINGAN MODEL VQC DAN QSVM PADA SIMULASI IDEAL DAN *REAL QUANTUM HARDWARE* UNTUK KLASIFIKASI JET

ROBERT GUNANTA BUKIT

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
2026**



@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. Heriyanto Syafutra, S.Si., M.Si.

Judul Skripsi : Perbandingan Model VQC dan QSVM Pada Simulasi Ideal dan
Real Quantum Hardware Untuk Klasifikasi Jet

Nama : Robert Gunanta Bukit

NIM : G7401221085

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

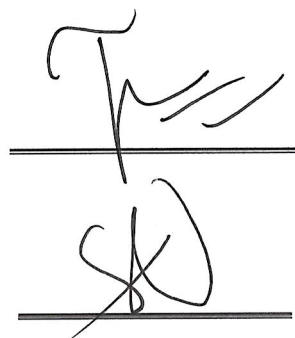
Prof. Dr. R. Tony I. Sumaryada W.P., S.Si.,
M.Si.

NIP. 197205191997021001

Pembimbing 2:

Dr. Sitti Yani S.Si., M.Si.

NIP. 198606242019032019



Diketahui oleh

Ketua Departemen Fisika:

Dr. Ir. Irmansyah, M.Si.

NIP. 196809161994031001



Tanggal Ujian: 13 Juli 2026

Tanggal Lulus:



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan kasih karunia-Nya sehingga karya ilmiah dengan judul “Perbandingan Model VQC dan QSVM Pada Simulasi Ideal dan *Real Quantum Hardware* Untuk Klasifikasi Jet” berhasil diselesaikan. Karya ilmiah ini dibuat sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana di Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Prof. Dr. R. Tony I. Sumaryada W.P. selaku pembimbing utama dan Ibu Dr. Sitti Yani, S.Si., M.Si. selaku pembimbing kedua yang telah membimbing penulis dalam mengerjakan penelitian ini dan juga banyak memberi saran dan masukan. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada almarhum ayah, ibu, serta seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan, doa, dan semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan usulan penelitian ini. Selain itu, terima kasih kepada teman-teman Fisika IPB Angkatan 59 yang penulis cintai serta seluruh sivitas akademika Fisika IPB yang selalu memberikan perhatian, dorongan dan motivasi yang menjadi salah satu sumber semangat bagi penulis. Penulis menyadari bahwa usulan penelitian ini masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis berharap adanya kritik dan saran yang membangun. bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan. Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Juli 2026

Robert Gunanta Bukit

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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xi
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	2
1.5 Ruang Lingkup	2
II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Jet	3
2.2 <i>Quantum Machine Learning (QML)</i>	4
2.3 <i>Quantum Support Vector Machine (QSVM)</i>	8
2.4 <i>Variational Quantum Classifier (VQC)</i>	9
2.5 <i>QML Pada Real Quantum Hardware</i>	9
III METODE	11
3.1 Waktu dan Tempat	11
3.2 Alat dan Bahan	11
3.3 Prosedur Kerja	11
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	17
4.1 Dataset	17
4.2 Prapemrosesan Data	20
4.3 Pemrosesan Data dan Desain Eksperimen	24
4.4 Hasil Pemodelan VQC	27
4.5 Hasil Pemodelan QSVM	30
4.6 Hasil Pengujian <i>Real Quantum Hardware</i>	32
V SIMPULAN DAN SARAN	33
5.1 Kesimpulan	33
5.2 Saran	33
DAFTAR PUSTAKA	34

DAFTAR TABEL

1.	Gerbang kuantum (Du <i>et al.</i> 2025)	5
2.	Beberapa QPU komputer kuantum IBM	10
3.	Variabel kunci yang digunakan dalam model prediksi	12
4.	Ringkasan statistik multijet primary dataset	17
5.	Distribusi total nilai invalid pada data	20
6.	Ringkasan arsitektur model eksperimen VQC	25
7.	Spesifikasi desain model boosted QSVM	26
8.	Spesifikasi QPU ibm fez & ibm marrakesh	27
9.	Ringkasan hasil evaluasi model boosted QSVM untuk setiap variasi sampel	31
10.	Hasil evaluasi pengujian <i>real quantum hardware</i> (komputer kuantum)	34

DAFTAR GAMBAR

1.	Ilustrasi Jet pada subdetektor kalorimeter	3
2.	Ilustrasi identifikasi Jet dengan algoritma anti-kt	4
3.	Perbandingan gerbang logika klasik dengan gerbang logika kuantum CNOT	8
4.	Diagram skematik model VQC (Yin <i>et al.</i> 2025)	9
5.	Tahapan Penelitian	11
6.	Sebaran jumlah data kelas jet	19
7.	Sebaran data kelas jet setelah pengelompokan	22
8.	Scree plot dan kumulatif rasio varians PCA	23
9.	Arsitektur sirkuit feature map dan ansatz VQC	25
10.	Loss function terhadap iterasi pada optimizer COBYLA	28
11.	Loss function terhadap iterasi pada optimizer Nelder-Mead	28
12.	Akurasi terhadap iterasi pada optimizer COBYLA	29
13.	Akurasi terhadap variasi sampel pada optimizer Nelder-Mead	30
14.	Akurasi terhadap variasi sampel pada model boosted QSVM	32
15.	Arsitektur sirkuit feature map dan ansatz VQC untuk real quantum hardware (komputer kuantum)	33
16.	Arsitektur sirkuit feature map QSVM untuk real quantum hardware (komputer kuantum)	34