

TESIS

**OPTIMASI PENGENALAN KARAKTER ARAB TULISAN
TANGAN MENGGUNAKAN MODEL *HYBRID QUANTUM
CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK* (QCNN) DENGAN
TEKNIK *DENSE ANGLE ENCODING***



Oleh:

Haerul Anam

NIM: 24206051019

PROGRAM STUDI INFORMATIKA

PROGRAM MAGISTER FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

UIN SUNAN KALIJAGA

YOGYAKARTA

2026

PERNYATAAN KEASLIAN

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Haerul Anam
NIM : 24206051019
Jenjang : Magister
Program Studi : Informatika

Menyatakan bahwa naskah tesis ini secara keseluruhan adalah hasil penelitian/karya saya sendiri, kecuali pada bagian-bagian yang dirujuk sumbernya.

Yogyakarta, 05 Agustus 2026

Saya yang menyatakan,



Haerul Anam

NIM: 24206051019

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Haerul Anam
NIM : 24206051019
Jenjang : Magister
Program Studi : Informatika

Menyatakan bahwa naskah tesis ini secara keseluruhan benar-benar bebas dari plagiasi. Jika di kemudian hari terbukti melakukan plagiasi, maka saya siap ditindaklanjuti sesuai ketentuan hukum yang berlaku.

Yogyakarta, 05 Agustus 2026

Saya yang menyatakan,



Haerul Anam

NIM: 24206051019

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PENGESAHAN



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1932/Un.02/DST/PP.00.9/08/2026

Tugas Akhir dengan judul : Optimasi Pengenalan Karakter Arab Tulis Tangan Menggunakan Model Hybrid Convolutional Neural Network (QCNN) dengan Teknik Dense Angle Encoding

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : HAERUL ANAM, S.Kom
Nomor Induk Mahasiswa : 24206051019
Telah diujikan pada : Selasa, 11 Agustus 2026
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Prof. Dr. Ir. Shofwatul 'Uyun, S.T., M.Kom., IPM., ASEAN Eng.
SIGNED

Valid ID: 6a8669403d894f



Penguji I

Muhammad Mustakim, S.T. M.T.
SIGNED

Valid ID: 6a867f58a1e31



Penguji II

Usfita Kiftiyani, M.Sc., Ph.D
SIGNED

Valid ID: 6a868437b68cd



Yogyakarta, 11 Agustus 2026
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a8784dcf2a0

HALAMAN PERSETUJUAN



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

BERITA ACARA UJIAN TUGAS AKHIR

Penyelenggaraan Ujian Tugas Akhir Mahasiswa

A. Waktu, Tempat dan Status Ujian Tugas Akhir:

1. Hari dan Tanggal : Selasa, 11 Agustus 2026
2. Pukul : 10:00 s/d 12:00 WIB
3. Tempat : FST-1-101
4. Status : Utama

B. Susunan Tim Ujian Tugas Akhir:

No.	Jabatan	Nama	Tanda Tangan
1.	Ketua Sidang	Prof. Dr. Ir. Shofwatul 'Uyun, S.T., M.Kom., IPM., ASEAN Eng.	 Valid ID: 6a8693d0e13dd
2.	Penguji I	Muhammad Mustakim, S.T. M.T.	 Valid ID: 6a867d7d7764f
3.	Penguji II	Usfita Kiftiyani, M.Sc., Ph.D	 Valid ID: 6a8683fb8af5a

C. Identitas Mahasiswa yang diuji:

1. Nama : HAERUL ANAM, S.Kom
2. Nomor Induk Mahasiswa : 24206051019
3. Program Studi : Informatika
4. Semester : IV
5. Program : S2
6. Status Kehadiran Mahasiswa : Menghadiri Ujian

D. Judul Tugas Akhir : Optimasi Pengenalan Karakter Arab Tulis Tangan Menggunakan Model Hybrid Convolutional Neural Network (QCNN) dengan Teknik Dense Angle Encoding

E. Pembimbing/Promotor:

1. Prof. Dr. Ir. Shofwatul 'Uyun, S.T., M.Kom., IPM., ASEAN Eng.

F. Keputusan Sidang

1. LULUS dengan Perbaikan
2. Predikat Kelulusan : 95.79 (A)
3. Konsultasi Perbaikan a. _____

b. _____



Yogyakarta, 11 Agustus 2026
Ketua Sidang/Pembimbing/Promotor,
Prof. Dr. Ir. Shofwatul 'Uyun, S.T., M.Kom.,
IPM., ASEAN Eng.
SIGNED

Valid ID: 6a8693d0e13dd

NOTA DINAS PEMBIMBING

NOTA DINAS PEMBIMBING

Kepada Yth,
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sunan Kalijaga
Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah melakukan bimbingan, arahan, dan koreksi terhadap penulisan tesis yang berjudul:

**OPTIMASI PENGENALAN KARAKTER ARAB TULISAN TANGAN
MENGUNAKAN MODEL *HYBRID QUANTUM CONVOLUTIONAL
NEURAL NETWORK* (QCNN) DENGAN TEKNIK *DENSE ANGLE
ENCODING***

Yang ditulis oleh:

Nama	: Haerul Anam
NIM	: 24206051019
Jenjang	: Magister
Program Studi	: Informatika

Saya berpendapat bahwa tesis tersebut sudah dapat diajukan kepada Magister Informatika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta untuk diujikan dalam rangka memperoleh gelar Magister Informatika.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 05 Agustus 2026

Pembimbing,

Prof. Dr. Ir. Shofwatul 'Uyun, S.T.,
M.Kom., IPM., ASEAN Eng
NIP: 198205112006042002

ABSTRAK

Pengenalan karakter Arab tulisan tangan menghadapi tantangan variasi gaya dan kemiripan morfologi, terutama pada karakter homoglif yang dibedakan oleh jumlah atau posisi titik. Pada *Hybrid Quantum Convolutional Neural Network* (HQCNN), tantangan tersebut juga berkaitan dengan keterbatasan representasi fitur saat fitur laten CNN dipetakan ke *quantum circuit*. *Angle Encoding* standar memetakan satu fitur ke satu *qubit*, sehingga kebutuhan *qubit* meningkat seiring dimensi fitur. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi *Hybrid Quantum Convolutional Neural Network* (HQCNN) dengan *Dense Angle Encoding* (DAE) untuk pengenalan karakter Arab tulisan tangan serta menganalisis pengaruh konfigurasi rotasi pada *quantum encoding*. Model mengintegrasikan *Convolutional Neural Network* (CNN) sebagai ekstraktor fitur dan *Variational Quantum Circuit* (VQC), sedangkan DAE memetakan fitur laten ke dalam *qubit* melalui kombinasi rotasi R_Y dan R_Z . Pengujian menggunakan *Arabic Handwritten Characters Dataset* (AHCD) yang terdiri atas 28 kelas karakter. Hasil menunjukkan bahwa HQCNN dengan DAE memperoleh accuracy 85,00%, lebih tinggi dibandingkan *Angle Encoding* standar sebesar 82,62% dan CNN konvensional sebesar 82,74%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa DAE berpotensi meningkatkan performa klasifikasi HQCNN, meskipun efisiensi komputasi dan generalisasi model masih perlu dikembangkan.

Kata Kunci: *Dense Angle Encoding, Hybrid QCNN, Karakter Arab, Quantum Machine Learning, Variational Quantum Circuit.*

ABSTRACT

Handwritten Arabic character recognition faces challenges due to variations in writing styles and morphological similarities, particularly among homoglyph characters that differ in the number or position of dots. In a Hybrid Quantum Convolutional Neural Network (HQCNN), these challenges are also related to limitations in feature representation when latent CNN features are mapped to a quantum circuit. Standard Angle Encoding maps one feature to one qubit, causing the required number of qubits to increase with the feature dimension. This study aims to develop and evaluate a Hybrid Quantum Convolutional Neural Network (HQCNN) with Dense Angle Encoding (DAE) for handwritten Arabic character recognition and to analyze the effect of R_Y and R_Z rotation configurations in quantum encoding. The model integrates a Convolutional Neural Network (CNN) as a feature extractor and a Variational Quantum Circuit (VQC), while DAE maps latent features onto qubits through a combination of rotation gates. Experiments were conducted using the Arabic Handwritten Characters Dataset (AHCD), consisting of 28 character classes. The results show that HQCNN with DAE achieved an accuracy of 83.00%, outperforming standard Angle Encoding at 82.62% and the conventional CNN at 82.74%. These results indicate that DAE has the potential to improve HQCNN classification performance, although computational efficiency and model generalization still require further development.

Keywords: *Dense Angle Encoding, Hybrid QCNN, Arabic Characters, Quantum Machine Learning, Variational Quantum Circuit.*

MOTTO

"Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya."

(QS. Al-Baqarah: 286)

"Kesabaran menuntun pada ketelitian, ketelitian melahirkan pengetahuan, dan pengetahuan menjadi jalan untuk memberi manfaat."



"Success is the sum of small efforts, repeated day in and day out."

— **Robert Collier**

"Setiap baris kode, setiap eksperimen, dan setiap kegagalan adalah bagian dari perjalanan menuju penemuan."

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur Alhamdulillah rabbil'alamin penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul **“Optimasi Pengenalan Karakter Arab Tulisan Tangan Menggunakan Model *Hybrid Quantum Convolutional Neural Network* (QCNN) dengan Teknik *Dense Angle Encoding*”** sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister pada Program Studi Magister Informatika di UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.

Tesis ini membahas implementasi *Hybrid Quantum Convolutional Neural Network* (Hybrid-QCNN) dengan *Dense Angle Encoding* sebagai pendekatan inovatif dalam meningkatkan performa sistem pengenalan karakter Arab tulisan tangan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang quantum machine learning, computer vision, dan pengenalan karakter berbasis komputasi kuantum.

Penyusunan tesis ini tentunya tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala hormat dan ketulusan, penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Noorhaidi Hasan, S.Ag., M.A., M.Phil., Ph.D., selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
2. Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.

3. Dr. Ir. Sumarsono, S.T., M.Kom., selaku Ketua Program Studi Magister Informatika, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
4. Prof. Dr. Ir. Shofwatul 'Uyun, S.T., M.Kom., IPM., ASEAN Eng., selaku dosen pembimbing tesis atas bimbingan, arahan, kesabaran, dan motivasi yang telah diberikan selama proses penyusunan tesis ini. Bimbingan beliau sangat berarti dalam mengarahkan penulis hingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik.
5. Dr. Ir. Aulia Faqih Rifa'i, M.Kom. selaku dosen pembimbing akademik yang telah membimbing selama proses studi yang kurang lebih dua tahun.
6. Seluruh dosen dan staf pengajar di Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta, yang telah memberikan ilmu dan wawasan selama masa studi.
7. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) dan Kementerian Agama Republik Indonesia (Kemenag RI) atas dukungan finansial melalui Program Beasiswa Santri Berprestasi (PBSB), yang memungkinkan penulis menempuh pendidikan magister ini dengan optimal.
8. Kedua orang tua tercinta beserta seluruh keluarga yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, motivasi, dan dukungan tanpa henti sehingga penulis dapat menyelesaikan studi ini dengan baik.
9. Rekan-rekan seperjuangan dan sahabat selama proses studi yang selalu memberikan semangat, kebersamaan, dan dukungan selama masa perkuliahan maupun penyusunan tesis ini.

Kebersamaan tersebut menjadi pengalaman yang sangat berharga bagi penulis.

10. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberikan bantuan, doa, dan dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung selama proses penyusunan tesis ini.

Penulis menyadari bahwa karya ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tesis ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya, khususnya di bidang *Quantum Machine Learning*, *Computer Vision*, dan pengenalan karakter Arab tulisan tangan.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, 05 Agustus 2026

Penulis,



Haerul Afham

NIM: 24206051019

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
NOTA DINAS PEMBIMBING	v
ABSTRAK.....	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
MOTTO	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR SINGKATAN.....	xvii
DAFTAR ISTILAH.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	6
C. Batasan Masalah.....	6
D. Tujuan Penelitian.....	7
E. Manfaat Penelitian.....	8
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	9
A. Kajian Pustaka.....	9
B. Landasan Teori.....	14
1. Komputasi Kuantum dan <i>Variational Quantum Circuit</i> ..	14
2. Mekanisme Data Encoding Kuantum	21

3. <i>Hybrid Quantum Convolutional Neural Network</i>	28
4. Fungsi Kerugian (<i>Loss Function</i>)	31
5. Mekanisme Optimasi	33
6. Metrik Evaluasi Klasifikasi	34
7. Morfologi dan Geometri Alfabet Arab	38
BAB III METODE PENELITIAN	42
A. Alur Penelitian.....	42
B. Pengumpulan dan Persiapan Data	43
1. Akuisisi Dataset.....	43
2. Pembagian Data	44
3. Implementasi Pra-pemrosesan.....	45
C. Perancangan Arsitektur Hybrid QCNN.....	46
1. Desain Lapisan Klasikal	46
2. Desain Lapisan Kuantum.....	49
3. Pengaturan <i>Hyperparameter</i>	52
D. Skenario Pengujian.....	53
1. Skenario Perbandingan Model.....	53
2. Skenario <i>Ablation Study</i> pada DAE.....	54
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	57
A. Hasil Pengujian.....	57
1. Analisis Perbandingan Performa Model.....	57
2. Analisis Kurva Pelatihan	60
3. Analisis <i>Ablation Study</i> pada Dense Angle Encoding	63
4. Analisis Confusion Matrix.....	68
B. Pembahasan.....	73
1. Pengaruh <i>Dense Angle Encoding</i>	73
2. Analisis Kinerja <i>Hybrid-QCNN</i> pada AHCR.....	76
3. Keterbatasan Penelitian	79

BAB V PENUTUP	82
A. Kesimpulan.....	82
B. Saran.....	83
DAFTAR PUSTAKA.....	85
LAMPIRAN	90
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	95



DAFTAR TABEL

No. Tabel	Halaman
2.1` Penelitian Terdahulu	13
2.2 Variasi Bentuk Karakter Arab pada Setiap Posisi.....	38
2.3 Kelompok Karakter Himoglif dan Titik <i>I'jam</i>	40
3.1 Ringkasan Arsitektur CNN	49
3.2 Setting <i>Hyperparameter</i>	52
4.1 Perbandingan Performa Eksperimen Model	57
4.2 Hasil <i>Ablation Study</i> terhadap Strategi <i>Quantum Encoding</i>	62
4.3 <i>Confusion Matrix</i> Karakter Arab Homoglif.....	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1`	Status <i>Qubit</i> pada Bola Bloch	14
Gambar 2.2	Rotasi Ruang Kuantum	15
Gambar 3.1	Alur Penelitian	42
Gambar 3.2	Dataset AHCD	44
Gambar 3.3	Desain Lapisan Klasikal (<i>Proposed</i>).....	46
Gambar 3.4	Desain Lapisan Kuantum (<i>Proposed</i>).....	49
Gamabar 4.1	Perbandingan <i>Training Loss</i> dan <i>Validation Accuracy</i> Model terhadap <i>Epoch</i>	60

DAFTAR SINGKATAN

AD	<i>Automatic Differentiation</i>
AHCD	<i>Arabic Handwritten Characters Dataset</i>
AHCR	<i>Arabic Handwritten Character Recognition</i>
AOCR	<i>Arabic Optical Character Recognition</i>
CNN	<i>Convolutional Neural Network</i>
CNOT	<i>Controlled-NOT Gate</i>
DAE	<i>Dense Angle Encoding</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
HOG	<i>Histogram of Oriented Gradients</i>
HPC	<i>High Performance Computer</i>
H-QCNN	<i>Hybrid Quantum Convolutional Neural Network</i>
LBP	<i>Local Binary Pattern</i>
MNIST	<i>Modified National Institute of Standards and Technology Database</i>
NISQ	<i>Noisy Intermediate-Scale Quantum</i>
OCR	<i>Optical Character Recognition</i>
PSR	<i>Parameter-Shift Rule</i>
QML	<i>Quantum Machine Learning</i>
QNN	<i>Quantum Neural Network</i>
VQC	<i>Variational Quantum Circuit</i>

DAFTAR ISTILAH

<i>Amplitude Encoding</i>	Teknik pengkodean data klasik ke dalam amplitudo keadaan kuantum sehingga sejumlah besar informasi dapat direpresentasikan menggunakan jumlah <i>qubit</i> yang relatif sedikit.
<i>Angle Encoding</i>	Teknik pengkodean data klasik ke dalam keadaan kuantum menggunakan sudut rotasi gerbang kuantum, seperti rotasi (R_y), (R_x), atau (R_z).
<i>Ansatz</i>	Struktur atau rancangan rangkaian kuantum parametrik yang digunakan sebagai model pembelajaran dalam <i>Variational Quantum Circuit</i> .
<i>Bloch Sphere</i>	Representasi geometris keadaan satu <i>qubit</i> pada ruang tiga dimensi yang menunjukkan hubungan antara amplitudo dan fase suatu keadaan kuantum.
<i>Classical Feature</i>	Informasi atau karakteristik yang diekstraksi dari data menggunakan metode komputasi klasik sebelum diproses oleh model kuantum.
<i>Convolution</i>	Operasi penyaringan (<i>filtering</i>) pada citra untuk mengekstraksi pola lokal seperti tepi, sudut, dan tekstur.
<i>Dense Angle Encoding</i>	Metode pengkodean yang diusulkan dalam penelitian ini dengan memanfaatkan dua fitur laten sebagai sudut rotasi (R_y) dan (R_z) pada setiap <i>qubit</i> sehingga meningkatkan efisiensi representasi informasi.

<i>Embedding</i>	Proses memetakan data dari ruang klasik ke ruang representasi lain, termasuk ruang keadaan kuantum.
<i>End-to-End Learning</i>	Strategi pelatihan model di mana seluruh komponen jaringan dioptimalkan secara bersamaan menggunakan satu fungsi objektif.
<i>Entanglement</i>	Fenomena kuantum ketika dua atau lebih qubit memiliki keadaan yang saling bergantung sehingga tidak dapat dijelaskan secara independen.
<i>Epoch</i>	Satu siklus penuh proses pelatihan ketika seluruh data latih telah diproses satu kali oleh model.
<i>Feature Extraction</i>	Proses memperoleh karakteristik penting dari data masukan sehingga lebih representatif untuk proses klasifikasi.
<i>Feature Map</i>	Representasi hasil proses konvolusi yang menggambarkan pola-pola penting yang berhasil diekstraksi dari citra.
<i>Gate Quantum</i>	Operasi logika pada qubit yang mengubah keadaan kuantum sesuai transformasi unitary tertentu.
<i>Gradient</i>	Nilai turunan fungsi kerugian terhadap parameter model yang digunakan dalam proses optimasi.
<i>Homoglyph Character</i>	Karakter yang memiliki bentuk visual sangat mirip sehingga sulit dibedakan oleh sistem pengenalan karakter.

<i>Hybrid Quantum-Classical Model</i>	Model pembelajaran yang menggabungkan jaringan saraf klasik dengan rangkaian kuantum parametrik dalam satu proses pelatihan.
<i>Inference Time</i>	Waktu yang dibutuhkan model untuk menghasilkan prediksi terhadap satu data masukan setelah proses pelatihan selesai.
<i>Latent Feature</i>	Representasi fitur tingkat tinggi hasil ekstraksi CNN yang menjadi masukan bagi rangkaian kuantum.
<i>Loss Function</i>	Fungsi yang mengukur selisih antara hasil prediksi model dan nilai target sebenarnya selama proses pelatihan.
<i>Measurement</i>	Proses pengukuran keadaan kuantum yang menghasilkan nilai probabilitas atau ekspektasi sebagai keluaran rangkaian kuantum.
<i>Observable</i>	Besaran fisik dalam mekanika kuantum yang dapat diukur melalui operator Hermitian.
<i>Optimizer</i>	Algoritma yang digunakan untuk memperbarui parameter model agar nilai fungsi kerugian semakin kecil.
<i>Padding</i>	Penambahan nilai di sekitar citra masukan untuk mempertahankan ukuran keluaran setelah operasi konvolusi.
<i>Parameter-Shift Rule</i>	Metode untuk menghitung gradien parameter pada rangkaian kuantum variasional dengan menggeser nilai parameter sebesar sudut tertentu.

<i>Pooling</i>	Operasi reduksi dimensi feature map untuk mempertahankan informasi penting sekaligus mengurangi kompleksitas komputasi.
<i>Probability Distribution</i>	Distribusi peluang hasil pengukuran keadaan kuantum.
<i>Quantum Circuit</i>	Susunan gerbang kuantum yang bekerja secara berurutan untuk memanipulasi keadaan qubit.
<i>Quantum Embedding</i>	Proses pemetaan data klasik ke ruang Hilbert melalui operasi gerbang kuantum.
<i>Quantum Feature</i>	Representasi fitur yang diperoleh setelah data diproses dalam ruang keadaan kuantum.
<i>Quantum State</i>	Keadaan matematis suatu sistem kuantum yang mendeskripsikan seluruh informasi fisiknya.
<i>Qubit</i>	Unit dasar informasi dalam komputasi kuantum yang dapat berada pada superposisi antara keadaan (
<i>Rotation Gate</i>	Gerbang kuantum yang memutar keadaan <i>qubit</i> terhadap sumbu (X), (Y), atau (Z) pada Bloch Sphere.
<i>Superposition</i>	Sifat dasar sistem kuantum yang memungkinkan <i>qubit</i> berada pada kombinasi beberapa keadaan secara bersamaan.
<i>Variational Layer</i>	Lapisan dalam rangkaian kuantum yang terdiri atas gerbang-gerbang parametrik dan dioptimalkan selama proses pembelajaran.

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Transformasi digital global telah memicu pergeseran paradigma dalam pengelolaan informasi, di mana integrasi teknologi kecerdasan buatan menjadi instrumen vital dalam pelestarian dan aksesibilitas literatur berbasis skrip non-latin di era Industri 4.0 dan *Society 5.0* (Lawgali, 2015; Permata Budi Asri & Humaira, 2026). Implementasi sistem *Optical Character Recognition* (OCR) kini tidak hanya berfungsi sebagai alat konversi teks mekanis, tetapi juga sebagai fondasi dalam preservasi digital warisan budaya serta dokumen administratif yang kompleks (Bergamaschi et al., 2022; Lorigo & Govindaraju, 2006). Urgensi digitalisasi ini semakin meningkat seiring dengan kebutuhan integrasi data lintas bahasa yang menuntut presisi tinggi dalam pengenalan pola otomatis guna meminimalisir hilangnya informasi pada dokumen sejarah (Al-Awadly et al., 2023; Romein et al., 2025). Oleh karena itu, pengembangan sistem pengenalan karakter yang adaptif terhadap skrip non-Latin menjadi prioritas dalam riset visi komputer modern untuk menjembatani kesenjangan akses informasi global (Buoy et al., 2023; Perwej et al., 2014).

Bahasa arab memegang kedudukan strategis sebagai salah satu bahasa internasional yang digunakan secara luas dalam konteks diplomatik, keagamaan, dan akademik, namun sistem penulisannya menyajikan kompleksitas morfologis yang sangat menantang bagi algoritma visi komputer (Alghyaline, 2024; Elsayy et al., 2017).

Karakteristik alfabet arab yang bersifat kursif, di mana bentuk huruf dapat berubah secara signifikan bergantung pada posisinya (di awal, tengah, akhir, atau berdiri sendiri), menciptakan kerumitan dalam proses segmentasi fitur (AlShehri, 2025; Eltay et al., 2020). Selain itu, keberadaan sistem *i'jam* atau titik-titik pembeda yang halus serta penggunaan ligatur yang tumpang tindih menuntut model komputasi yang mampu menangkap fitur geometris dengan tingkat kedetailan yang ekstrem (Al-Awadly et al., 2023; Hamad & Shehab, 2024). Tantangan morfologi ini mengharuskan adanya pendekatan ekstraksi fitur yang lebih canggih daripada sekadar pemrosesan piksel linear konvensional.

Meskipun model *Convolutional Neural Networks* (CNN) telah menjadi standar emas dalam pengenalan pola, arsitektur ini memiliki keterbatasan intrinsik saat dihadapkan pada variansi tulisan tangan manusia yang memiliki tingkat distorsi tinggi (Zafar et al., 2024). CNN konvensional seringkali gagal mempertahankan fitur spasial mikro ketika melalui proses *pooling* yang agresif, yang berakibat pada hilangnya detail krusial yang membedakan satu karakter dengan karakter lainnya (Ayadi et al., 2025; Zafar et al., 2024). Risiko hilangnya fitur mikro ini sangat fatal dalam karakter arab, di mana perbedaan satu piksel pada posisi titik dapat mengubah identitas fonetik secara keseluruhan (Attar, 2025; Firdaus et al., 2025). Selain itu, konsumsi parameter yang masif dalam jaringan saraf klasik menimbulkan inefisiensi komputasi yang signifikan, terutama ketika model dipaksa untuk mengenali pola yang memerlukan abstraksi tingkat tinggi (Alghyaline, 2024; Mukhanbet et al., 2026).

Data empiris dari berbagai penelitian terbaru menunjukkan bahwa kegagalan klasifikasi pada karakter arab seringkali berpusat pada

kelompok karakter homoglif, yakni karakter yang memiliki struktur dasar identik namun hanya dibedakan oleh jumlah atau posisi titik, seperti pada huruf *Ba*, *Ta*, dan *Tha* (AlShehri, 2025). Statistik menunjukkan bahwa margin kesalahan pada karakter homoglif ini tetap tinggi pada model CNN standar karena keterbatasan model dalam membedakan antara noise pada tulisan tangan dan fitur *i'jam* yang sah (Al-Awadly et al., 2023; Attar, 2025). Ketidakmampuan algoritma klasik untuk merepresentasikan hubungan spasial yang kompleks antara tubuh huruf dan titik pembeda menjadi hambatan utama dalam mencapai akurasi mendekati sempurna (Eltay et al., 2020; Hamad & Shehab, 2024). Hal ini menegaskan adanya kebutuhan mendesak untuk mengeksplorasi ruang fitur baru yang lebih ekspresif, di mana representasi data tidak hanya terbatas pada koordinat dua dimensi, tetapi juga memanfaatkan ruang Hilbert yang disediakan oleh komputasi kuantum (Long et al., 2025).

Lahirnya komputasi kuantum telah membuka cakrawala baru dalam bidang pembelajaran mesin melalui *Quantum Machine Learning* (QML) yang menawarkan potensi efisiensi parameter dan kapasitas representasi data yang jauh melampaui kemampuan jaringan saraf klasik (L. Chen et al., 2024; Oh et al., 2020). Implementasi *Hybrid Quantum Convolutional Neural Network* (QCNN) menjadi sangat relevan dalam visi komputer karena kemampuannya memetakan fitur gambar ke dalam ruang Hilbert berdimensi tinggi, yang secara teoretis dapat menangkap korelasi non-linear yang tidak terjangkau oleh kernel konvensional (S. Y.-C. Chen et al., 2022; Long et al., 2025). Melalui pemanfaatan prinsip superposisi dan keterikatan (*entanglement*), model *hybrid* ini memungkinkan identifikasi hubungan spasial antara komponen karakter

arab dan titik *i'jam* dengan jumlah parameter yang jauh lebih minimal dibandingkan arsitektur CNN klasik yang sangat dalam (Hafeez et al., 2024; Liu et al., 2025). Namun, transisi dari data klasik ke dalam status kuantum masih menghadapi hambatan besar pada tahap *encoding* data yang menentukan kualitas ekstraksi fitur pada sirkuit kuantum.

Kesenjangan penelitian saat ini terletak pada dominasi penggunaan *Angle Encoding* sederhana yang hanya memanfaatkan rotasi satu sumbu pada bola Bloch untuk merepresentasikan intensitas piksel (Mukhanbet et al., 2026). Teknik *encoding* standar tersebut cenderung mengalami kehilangan variansi data (*information loss*) yang signifikan karena keterbatasan jangkauan ruang state yang dapat ditempati oleh *qubit* (LaRose & Coyle, 2020). Dalam konteks karakter Arab yang memiliki detail morfologi halus, keterbatasan jangkauan representasi ini menyebabkan model kesulitan membedakan antara fitur intrinsik karakter dan derau (*noise*) penulisan, terutama pada karakter-karakter homoglif yang memerlukan presisi pemetaan tingkat tinggi (Al-Awadly et al., 2023; AlShehri, 2025). Minimnya eksplorasi terhadap teknik pemetaan data yang lebih kompleks dan adaptif terhadap geometri karakter menjadi hambatan utama dalam mencapai stabilitas konvergensi pada model QML untuk skrip kursif.

Sebagai upaya mitigasi terhadap kelemahan tersebut, penelitian ini mengusulkan modifikasi teknik *Dense Angle Encoding*. Teknik ini menembus batasan pemetaan satu-ke-satu dengan cara mengompresi dua fitur spasial laten dari CNN ke dalam satu *qubit* secara simultan melalui rotasi ganda berurutan pada sumbu R_y dan R_z (Mukhanbet et al., 2026). Melalui kombinasi perkalian sudut rotasi yang berbeda (π untuk R_y dan 2π untuk R_z), status kuantum dipaksa untuk mengeksplorasi

seluruh permukaan sferis *Bola Bloch* secara komprehensif, bukan hanya berotasi pada satu ekuator (LaRose & Coyle, 2020). Pendekatan ini efektif "membungkus" fitur morfologi karakter arab yang kompleks ke dalam ruang fase kuantum yang berdimensi lebih tinggi (Mutiarra et al., 2020). Dengan mengintegrasikan teknik ini ke dalam arsitektur QCNN, model mampu memproses 12 dimensi fitur laten hanya dengan menggunakan 6 *qubit* (Mukhanbet et al., 2026), yang secara teoretis memberikan efisiensi komputasi sekaligus sensitivitas yang lebih tinggi terhadap perbedaan *i'jam* pada karakter homoglif.

Penelitian ini memiliki urgensi yang tinggi mengingat tuntutan akan sistem OCR Arab yang memiliki ketahanan (*robustness*) tinggi pada perangkat dengan keterbatasan sumber daya komputasi. Melalui optimasi pada tahap *encoding*, penelitian ini bertujuan untuk membuktikan bahwa sinergi antara CNN klasik sebagai pengekstrak fitur awal dan QCNN sebagai pengklasifikasi dengan *Dense Angle Encoding* dapat melampaui performa model saat ini. Kontribusi utama penelitian ini tidak hanya terletak pada peningkatan akurasi pengenalan, tetapi juga pada pengembangan metodologi representasi data kuantum yang lebih efisien bagi bahasa-bahasa dengan sistem penulisan kompleks. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi fondasi bagi arsitektur pengenalan pola masa depan yang mengintegrasikan keunggulan komputasi kuantum ke dalam aplikasi dunia nyata.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah dipaparkan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana implementasi integrasi CNN klasikal, *Dense Angle Encoding*, dan *Variational Quantum Circuit* dalam membentuk model *Hybrid-QCNN* untuk pengenalan karakter Arab tulisan tangan?
2. Bagaimana performa model *Hybrid-QCNN* dengan *Dense Angle Encoding* dibandingkan dengan CNN konvensional dan *Hybrid-QCNN* dengan *Angle Encoding* standar berdasarkan metrik klasifikasi, waktu inferensi, dan jumlah parameter?
3. Bagaimana pengaruh konfigurasi *Dense Angle Encoding*, termasuk jenis dan urutan rotasi R_Y dan R_Z , terhadap performa model serta pola klasifikasi karakter Arab yang memiliki kemiripan morfologi, dan apa saja keterbatasan komputasi dari model yang dikembangkan?

C. Batasan Masalah

Agar penelitian ini tetap fokus dan terarah sesuai dengan ruang lingkup teknis yang telah ditentukan, maka ditetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Data yang digunakan adalah *Arabic Handwritten Characters Dataset* (AHCD) yang terdiri dari 16.800 karakter tunggal tanpa melibatkan kata bersambung atau kalimat utuh.
2. Model yang dikembangkan terbatas pada struktur *Hybrid QCNN*, di mana CNN klasikal berfungsi sebagai *feature*

extractor dan sirkuit kuantum (*Variational Quantum Circuit*) berfungsi sebagai pengklasifikasi.

3. Fokus optimasi dilakukan pada tahap *Quantum Embedding* menggunakan metode *Dense Angle Encoding*.
4. Simulasi sirkuit kuantum diimplementasikan menggunakan *framework* PennyLane dengan *backend* GPU pada HPC (*High Performance Computer*).
5. Jumlah *qubit* yang digunakan dibatasi maksimal 6 *qubit* guna menjaga stabilitas simulasi dan menghindari beban komputasi yang eksponensial pada perangkat simulator.

D. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai melalui pelaksanaan penelitian ini adalah:

1. Memvalidasi implementasi integrasi CNN klasikal, *Dense Angle Encoding*, dan *Variational Quantum Circuit* sebagai satu kesatuan model *Hybrid-QCNN* untuk pengenalan karakter Arab tulisan tangan.
2. Menganalisis dan mengevaluasi performa model *Hybrid-QCNN* dengan *Dense Angle Encoding* secara komparatif terhadap CNN konvensional dan *Hybrid-QCNN* dengan *Angle Encoding* standar berdasarkan *accuracy*, *precision*, *recall*, *F1-score*, waktu inferensi, dan jumlah parameter.
3. Menganalisis pengaruh konfigurasi *Dense Angle Encoding*, termasuk jenis dan urutan rotasi R_Y dan R_Z , terhadap performa model serta pola klasifikasi karakter Arab yang memiliki

kemiripan morfologi, sekaligus mengidentifikasi keterbatasan komputasi model yang dikembangkan.

E. Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan secara teoretis maupun praktis:

1. Manfaat Teoritis
 - a. Memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan disiplin *Quantum Machine Learning* (QML), khususnya dalam strategi representasi data untuk sistem penulisan non-Latin.
 - b. Memperkaya literatur mengenai perbandingan efektivitas metode *quantum encoding* dalam menangani data gambar dengan tingkat detail geometris yang tinggi
2. Manfaat Praktis
 - a. Menjadi landasan bagi pengembangan sistem pengenalan karakter otomatis (OCR) berbasis kuantum yang lebih efisien dan akurat bagi pengguna bahasa Arab di seluruh dunia.
 - b. Membantu instansi terkait dalam melakukan digitalisasi dan restorasi dokumen sejarah atau administratif berbahasa Arab dengan tingkat kesalahan klasifikasi yang lebih rendah.
 - c. Memberikan alternatif model pembelajaran mesin yang lebih hemat parameter namun tetap memiliki kapasitas ekspresi yang tinggi untuk diimplementasikan pada perangkat masa depan

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, model *Hybrid-Quantum Convolutional Neural Network* (HQCNN) dengan *Dense Angle Encoding* berhasil diimplementasikan melalui integrasi *Convolutional Neural Network* (CNN) sebagai ekstraktor fitur, *Dense Angle Encoding* sebagai metode pemetaan fitur laten ke dalam ruang kuantum, dan *Variational Quantum Circuit* (VQC) sebagai bagian dari proses klasifikasi karakter Arab tulisan tangan. Pada konfigurasi yang digunakan, 12 fitur laten dari CNN dipetakan ke dalam 6 qubit menggunakan kombinasi rotasi R_Y dan R_Z , kemudian diproses melalui *variational quantum circuit* dan hasil pengukurannya digunakan untuk menghasilkan prediksi terhadap 28 kelas karakter Arab. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *Hybrid-QCNN* dengan *Dense Angle Encoding* memperoleh *accuracy* sebesar 85,00%, *precision* sebesar 85,38%, *recall* sebesar 85,00%, dan *F1-score* sebesar 85,02%, sehingga menghasilkan performa klasifikasi yang lebih tinggi dibandingkan CNN konvensional dengan *accuracy* 82,74% dan *Hybrid-QCNN* dengan *Angle Encoding* standar dengan *accuracy* 82,62% pada konfigurasi eksperimen yang digunakan. Hasil *ablation study* menunjukkan bahwa konfigurasi *Ry-Only* memperoleh *accuracy* sebesar 91,01%, *Rz-Only* sebesar 3,57%, *Rz* dan *Ry* sebesar 91,61%, sedangkan konfigurasi *Ry* dan *Rz* memperoleh hasil tertinggi sebesar 93,75%, sehingga menunjukkan bahwa jenis dan urutan rotasi pada *Dense Angle Encoding* berpengaruh

terhadap performa model, dengan konfigurasi R_Y dan R_Z memberikan hasil terbaik pada penelitian ini. Analisis *confusion matrix* juga menunjukkan kemampuan model dalam mengenali sejumlah karakter Arab yang memiliki kemiripan morfologi, meskipun kesalahan klasifikasi masih ditemukan pada beberapa kelas. Di sisi lain, peningkatan performa tersebut masih disertai konsekuensi komputasi, ditunjukkan oleh waktu inferensi *Dense Angle Encoding* sebesar 0,5277 detik, yang lebih tinggi dibandingkan CNN konvensional sebesar 0,0321 detik. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa *Dense Angle Encoding* memberikan peningkatan performa klasifikasi pada model *Hybrid-QCNN* dalam kondisi eksperimen penelitian ini, tetapi belum menunjukkan keunggulan dari sisi efisiensi waktu inferensi, sementara keterbatasan penelitian berupa penggunaan satu dataset, lingkungan simulasi kuantum, dan biaya komputasi yang relatif tinggi menjadi aspek yang perlu dipertimbangkan dalam pengembangan penelitian selanjutnya.

B. Saran

Berdasarkan hasil dan keterbatasan penelitian, beberapa pengembangan yang dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. **Pengembangan Dataset:** Penelitian selanjutnya dapat menggunakan dataset karakter Arab tulisan tangan yang lebih beragam, baik dari sisi jumlah penulis, variasi gaya tulisan, maupun karakteristik citra. Pengujian pada dataset eksternal juga diperlukan untuk mengevaluasi kemampuan generalisasi model

terhadap data yang tidak digunakan selama proses pengembangan model.

2. **Implementasi pada Perangkat Keras Kuantum:** Model yang dikembangkan pada penelitian ini masih dievaluasi menggunakan simulator kuantum. Penelitian selanjutnya dapat mengimplementasikan model pada perangkat keras kuantum nyata untuk mengevaluasi pengaruh *quantum noise*, kesalahan gerbang, *decoherence*, dan kesalahan pengukuran terhadap performa klasifikasi.
3. **Eksplorasi Konfigurasi *Quantum Circuit*:** Penelitian selanjutnya dapat mengeksplorasi konfigurasi *quantum circuit* yang lebih beragam, seperti jumlah *variational layer*, pola *entanglement*, jenis gerbang rotasi, serta strategi *quantum encoding* lainnya. Pengujian tersebut dapat digunakan untuk mengetahui apakah kombinasi konfigurasi tertentu mampu memberikan performa yang lebih baik dengan kompleksitas yang lebih rendah.
4. **Optimasi Efisiensi Komputasi:** Waktu inferensi *Hybrid-QCNN* pada simulator masih relatif tinggi dibandingkan CNN konvensional. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada optimasi jumlah *qubit*, kedalaman *quantum circuit*, jumlah operasi kuantum, maupun metode simulasi untuk mengurangi biaya komputasi tanpa mengurangi performa klasifikasi secara signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- AbuGhanem, M. (2025). IBM Quantum Computers: Evolution, Performance, and Future Directions. *The Journal of Supercomputing*, 81, 119. <https://doi.org/10.1007/s11227-025-07047-7>
- Akrom, M., & Prabowo, W. A. E. (2019). Classical-Quantum CNN Hybrid for Image Classification. *Techno.COM*, 18(4), 361–371.
- Al-Awadly, E. M. K., Ebada, A. I., & Al-Zoghby, A. M. (2023). Arabic Handwritten Text Recognition Systems: Challenges and Opportunities. *Egyptian Journal of Language Engineering*, 10(2), 84–100.
- Alghyaline, S. (2024). Optimised CNN Architectures for Handwritten Arabic Character Recognition. *Computers, Materials & Continua*, 79(3), 4905–4924. <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.052016>
- Ali, A. A. A., & Mallaiah, S. (2022). Intelligent handwritten recognition using hybrid CNN architectures based-SVM classifier with dropout. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 34(6), 3294–3300. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.01.012>
- AlJarrah, M. N., Zyout, M. M., & Duwairi, R. (2021). Arabic Handwritten Characters Recognition Using Convolutional Neural Network. *2021 12th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS)*, 182–188. <https://doi.org/10.1109/ICICS52457.2021.9464596>
- AlShehri, H. (2025). Image-Based Recognition of Children's Handwritten Arabic Characters Using a Confidence-Weighted Stacking Ensemble. *Sensors*, 25(24), 7671. <https://doi.org/10.3390/s25247671>
- Alyahya, H., Ismail, M. M. Ben, & Al-Salman, A. (2020). Deep ensemble neural networks for recognizing isolated Arabic handwritten characters. *ACCENTS Transactions on Image Processing and Computer Vision*, 6(21), 68–79. <https://doi.org/10.19101/tipcv.2020.618051>
- Attar, E. T. (2025). Deep convolutional neural network for isolated Arabic handwritten character recognition: design, evaluation, and comparative study. *Scientific Reports*, 15(1), 42467. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-26658-x>

- Ayadi, M., Masmoudi, N., Almuqren, L., Alshahrani, H. S., & Aljohani, R. O. (2025). Designing a Novel CNN–LSTM-based Model for Arabic Handwritten Character Recognition for the Visually Impaired Person. *Journal of Disability Research*, 4, 1–13. <https://doi.org/10.57197/JDR-2024-0080>
- Bergamaschi, S., De Nardis, S., Martoglia, R., Ruozzi, F., Sala, L., Vanzini, M., & Vigliermo, R. A. (2022). Novel Perspectives for the Management of Multilingual and Multialphabetic Heritages through Automatic Knowledge Extraction: The DigitalMaktaba Approach. *Sensors*, 22(11), 3995. <https://doi.org/10.3390/s22113995>
- Buoy, R., Iwamura, M., Srun, S., & Kise, K. (2023). Toward a Low-Resource Non-Latin-Complete Baseline: An Exploration of Khmer Optical Character Recognition. *IEEE Access*, 11, 128044–128060. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3332361>
- Chadli, M. A., Bouiadjra, R. B., Fekir, A., Martínez-Gómez, J., & Gámez, J. A. (2024). Data Augmentation for Offline Arabic Handwritten Text Recognition Using Moving Least Squares. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 38(1), 1–9. <https://doi.org/10.18280/ria.380101>
- Chen, L., Li, T., Chen, Y., Chen, X., Wozniak, M., Xiong, N., & Liang, W. (2024). Design and analysis of quantum machine learning: a survey. *Connection Science*, 36(1). <https://doi.org/10.1080/09540091.2024.2312121>
- Chen, S. Y.-C., Wei, T.-C., Zhang, C., Yu, H., & Yoo, S. (2022). Quantum Convolutional Neural Networks for High Energy Physics Data Analysis. *Physical Review Research*, 4, 13231. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.4.013231>
- Choudhary, P. K., Innan, N., Shafique, M., & Singh, R. (2025). HQNN-FSP: A Hybrid Classical-Quantum Neural Network for Regression-Based Financial Stock Market Prediction. *ArXiv Preprint ArXiv:2503.15403*.
- Cowlessur, H., Thapa, C., Alpcan, T., & Camtepe, S. (2026). *Parameter-efficient Quantum Multi-task Learning*.
- Elsawy, A., Loey, M., & El-Bakry, H. M. (2017). Arabic Handwritten Characters Recognition using Convolutional Neural Network. *WSEAS Transactions on Computer Research*, 5, 11–19.
- Eltay, M., Zidouri, A., & Ahmad, I. (2020). Exploring Deep Learning Approaches to Recognize Handwritten Arabic Texts. *IEEE Access*, 8, 89882–89895. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2994248>

- Fan, F., Shi, Y., Guggemos, T., & Zhu, X. X. (2024). Hybrid Quantum-Classical Convolutional Neural Network Model for Image Classification. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 35(12), 18145–18159. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2023.3312170>
- Feng, X. (2025). *A Comparative Study of Encoding Strategies for Quantum Convolutional Neural Networks*.
- Firdaus, M. I. Z., Saidah, S., & Ibrahim, N. (2025). Klasifikasi Tulisan Tangan Bahasa Arab Menggunakan Teknik YOLO. *E-Proceeding of Engineering*, 12(4), 5122–5130.
- Gong, L.-H., Chen, Y.-Q., Zhou, S., & Zeng, Q. (2025). Dual Discriminators Quantum Generation Adversarial Network Based on Quantum Convolutional Neural Network. *Advanced Quantum Technologies*, 8, 2500224. <https://doi.org/10.1002/qute.202500224>
- Hafeez, M. A., Munir, A., & Ullah, H. (2024). H-QNN: A Hybrid Quantum-Classical Neural Network for Improved Binary Image Classification. *AI*, 5, 1462–1481. <https://doi.org/10.3390/ai5030070>
- Hamad, H. A. Al, & Shehab, M. (2024). Improving the Segmentation of Arabic Handwriting Using Ligature Detection Technique. *Computers, Materials & Continua*, 79(2), 2015–2034. <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.048527>
- He, X., Gong, L., & Zhou, N. (2025). Image Denoising with Hybrid Classical-Quantum Convolutional Neural Network. *Memetic Computing*, 17(2), 23. <https://doi.org/10.1007/s12293-025-00463-5>
- King, A., Nocera, A., Rams, M. M., Dziarmaga, J., Wiersema, R., Bernoudy, W., Raymond, J., & Kaushal, N. (2025). Beyond-Classical Computation in Quantum Simulation. *Science*, 388, eado6285. <https://doi.org/10.1126/science.ado6285>
- Lakhdar-Hamina, D., Liu, X., Barney, R., Miller, S. H., Green, A. M., Linke, N. M., & Galitski, V. (2025). Benchmarking a Tunable Quantum Neural Network on Trapped-Ion and Superconducting Hardware. *ArXiv Preprint ArXiv:2507.21222*.
- LaRose, R., & Coyle, B. (2020). Robust Data Encodings for Quantum Classifiers. *ArXiv Preprint ArXiv:2003.01695*.
- Lawgali, A. (2015). A Survey on Arabic Character Recognition. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 8(2), 37–50. <https://doi.org/10.14257/ijsp.2015.8.2.37>

- Li, Y., Qi, Z., Li, Y., Yang, H., Shang, R., & Jiao, L. (2025). A Distributed Hybrid Quantum Convolutional Neural Network for Medical Image Classification. *ArXiv Preprint ArXiv:2501.06225*.
- Liu, C.-Y., Yang, C.-H. H., Goan, H.-S., & Hsieh, M.-H. (2025). *A Quantum Circuit-Based Compression Perspective for Parameter-Efficient Learning*.
- Long, C., Huang, M., Ye, X., Futamura, Y., & Sakurai, T. (2025). Hybrid Quantum-Classical-Quantum Convolutional Neural Networks. *Scientific Reports*, 15, 13417. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13417-1>
- Lorigo, L. M., & Govindaraju, V. (2006). Offline Arabic Handwriting Recognition: A Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28(5), 712–724. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2006.102>
- Mukhanbet, A., Trigo, P., & Daribayev, B. (2026). Systematic Literature Review of Quantum Convolutional Neural Networks and Circuit Optimization. *Research Square Preprint*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-8945562/v1>
- Mutiara, A. B., Slamet, M. A., Refianti, R., & Sutanto, Y. (2020). Handwritten Numeric Image Classification with Quantum Neural Network using Quantum Computer Circuit Simulator. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(10), 310–317.
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2001). *Quantum computation and quantum information* (Tenth, Vol. 2).
- Oh, S., Choi, J., & Kim, J. (2020). A Tutorial on Quantum Convolutional Neural Networks (QCNN). *ArXiv Preprint ArXiv:2009.09423*.
- Oh, S., Roh, E. J., Vasilakos, A. V., Park, S., & Kim, J. (2026). Fourier Analysis Perspective on Quantum Neural Networks. *Communications Physics*, 9(1), 176. <https://doi.org/10.1038/s42005-026-02680-x>
- Permata Budi Asri, D., & Humaira, I. (2026). Digital Cultural Heritage Protection in the Era of Artificial Intelligence from the Perspective of Indonesian Intellectual Property Law. *International Journal of Science and Environment (IJSE)*, 6(1), 610–616. <https://doi.org/10.51601/ijse.v6i1.379>
- Perweej, Y., Hannan, S. A., & Akhtar, N. (2014). The State of the Art Handwritten Recognition of Arabic Script Using Simplified Fuzzy

- ARTMAP and Hidden Markov Models. *International Journal of Computer Science and Telecommunications*, 5(8), 26–33.
- Ranga, D., Prajapat, S., Akhtar, Z., Kumar, P., & Vasilakos, A. V. (2024). Hybrid Quantum–Classical Neural Networks for Efficient MNIST Binary Image Classification. *Mathematics*, 12, 3684. <https://doi.org/10.3390/math12233684>
- Romein, C. A., Rabus, A., Leifert, G., & Ströbel, P. B. (2025). Assessing advanced handwritten text recognition engines for digitizing historical documents. *International Journal of Digital Humanities*, 7(1), 115–134. <https://doi.org/10.1007/s42803-025-00100-0>
- Shugaba, F. A., Ullah Sheikh, U., Othman, M. A., Khamis, N., & Abdulfattah, M. H. (2025). Towards Robust Recognition of Handwritten Arabic Characters with Diacritics Using an Incremental Learning Approach Based on CNNs. *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, 253–267. <https://doi.org/10.24003/emitter.v13i2.982>
- Su, L., Li, D., & Qiu, D. (2025). BLS-QLSTM: A Novel Hybrid Quantum Neural Network for Stock Index Forecasting. *Humanities and Social Sciences Communications*, 12, 5348. <https://doi.org/10.1057/s41599-025-05348-z>
- Ullah, Z., & Jamjoom, M. (2022). An intelligent approach for Arabic handwritten letter recognition using convolutional neural network. *PeerJ Computer Science*, 8, e995. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.995>
- Yousif, M., Al-Khateeb, B., & Garcia-Zapirain, B. (2024). A New Quantum Circuits of Quantum Convolutional Neural Network for {X-Ray} Images Classification. *IEEE Access*, 12, 74505–74518. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3396411>
- Zafar, A., Saba, N., Arshad, A., Alabrah, A., Riaz, S., Suleman, M., Zafar, S., & Nadeem, M. (2024). Convolutional Neural Networks: A Comprehensive Evaluation and Benchmarking of Pooling Layer Variants. *Symmetry*, 16(11), 1516. <https://doi.org/10.3390/sym16111516>