



MODEL DESIGN OF QUANTUM COMPUTING  
FOR BREAKING THE CURSE OF  
DIMENSIONALITY  
FOR HIGH DIMENSIONAL DATA

PROPOSAL DISERTASI

DHANNYSETIAWAN

99219027

PROGRAM DOKTOR TEKNOLOGI INFORMASI  
UNIVERSITAS GUNADARMA  
2021

## DAFTAR ISI

<b>DAFTAR ISI</b> . . . . .	ii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> . . . . .	iii
<b>DAFTAR TABEL</b> . . . . .	iv
<b>BAB I : PENDAHULUAN</b> . . . . .	1
1.1 Latar Belakang . . . . .	1
1.2 Rumusan Masalah . . . . .	2
1.3 Tujuan dan Batasan Penelitian . . . . .	2
1.3.1 Tujuan Penelitian . . . . .	2
1.3.2 Batasan Penelitian . . . . .	3
1.4 Kontribusi dan Manfaat Penelitian . . . . .	3
<b>BAB II : TELAAH PUSTAKA</b> . . . . .	4
2.1 <i>Dimensionality Reduction</i> . . . . .	4
2.2 <i>Multidimensional Indexing</i> . . . . .	5
2.3 <i>Quantum Computing</i> . . . . .	7
2.4 Perbandingan Telaah Pustaka . . . . .	11
<b>BAB III : METODE PENELITIAN</b> . . . . .	13
3.1 Gambaran Umum Penelitian . . . . .	13
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> . . . . .	15

## DAFTAR GAMBAR

2.1	<i>State-of-the-art</i> . . . . .	12
3.1	Tahapan Penelitian . . . . .	13

## DAFTAR TABEL

2.1	Beberapa Penelitian Terakhir Mengenai <i>Dimensionality Reduction</i> . .	4
2.2	Beberapa Penelitian Terakhir Mengenai <i>Multimedimensional Indexing</i>	6
2.3	Beberapa Penelitian Terakhir Mengenai <i>Quantum Computing</i> . . . .	8

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada tahun 1957, Richard E. Bellman memperkenalkan istilah kutukan dimensi dalam pemrograman dinamis. Kutukan dimensi muncul sebagai akibat dari semakin berkembangnya dunia digital, sehingga kebutuhan akan data menjadi semakin besar, bahkan seringkali menjadi *high-multidimensional data*. Hal ini masih menjadi hal yang cukup menakutkan sampai saat ini terutama dalam *multidimensional queries* (misalnya seperti *machine learning*, *data mining*, *content-based information retrieval*, dan lain sebagainya). Perkembangan data yang sangat besar dalam beberapa tahun terakhir menimbulkan sebuah masalah baru yang disebut dengan *information gap*, dimana data berkembang secara eksponensial tetapi pemrosesan atau analisis data hanya dilakukan terhadap sebagian data. Kebutuhan akan pemrosesan dan analisis data ini menyebabkan perkembangan dalam penelitian mengenai big data untuk mengembangkan teori dan metode praktis untuk menyimpan, memproses dan menganalisis data tersebut. Tantangan big data melingkupi pengambilan data, penyimpanan data, analisis, pencarian dan pembagian data (Zgurovsky & Zaychenko 2020).

Untuk meningkatkan akurasi dalam pengolahan data yang besar maka dibutuhkan banyak fitur yang diolah, dan karena fitur merupakan representasi objek, maka semakin banyak fitur yang ada semakin besar dimensi yang ada, sehingga perlu ada *trade off* antara akurasi dan kecepatan pemrosesan data. Pada saat ini, kasus-kasus yang ada menunjukkan bahwa data berjumlah sangat besar, sehingga kesulitan dalam memproses data tersebut atau membutuhkan waktu yang sangat lama, selain itu, proses yang lama dapat menyebabkan nilai informasi menjadi kadaluarsa misalkan untuk data yang bersifat *streaming* contohnya *data time series* seperti fluktuasi harga saham, untuk itu diperlukan model komputasi yang memiliki kecepatan pemrosesan data yang tinggi. Beberapa penelitian sejak 2012 memperlihatkan bahwa arsitektur multi-layer mampu meningkatkan kecepatan pemrosesan data secara signifikan dengan mengeksekusi perintah secara paralel. Beberapa penelitian terkait untuk mengatasi permasalahan besarnya data dapat dikategorikan menjadi dua kategori yaitu *dimensionality reduction* dan *multidimensional indexing* dalam bentuk

struktur pohon atau menggunakan fungsi hash.

*Quantum computing* adalah penggunaan fenomena mekanika kuantum untuk melakukan komputasi. Perkembangan dari *quantum computing* didukung oleh perkembangan dari *quantum computer* yang memungkinkan untuk menyelesaikan permasalahan komputasi lebih cepat dibandingkan komputer klasik. Komputasi dilakukan dengan memanipulasi qubits dengan menggunakan *quantum logic gates*. Permasalahan dalam *quantum computer* adalah perlunya *error correction* yang signifikan dikarenakan *quantum computer* sangat rentan terhadap dekoherensi yang diakibatkan oleh vibrasi, fluktuasi suhu, gelombang elektromagnetik, dan sebagainya (Franklin & Chong 2004). Setiap permasalahan komputasi yang dapat diselesaikan oleh komputer klasik, secara prinsip dapat diselesaikan juga oleh *quantum computer* dan juga berlaku sebaliknya. *Quantum computing* dipercaya dapat menurunkan kompleksitas waktu dengan memungkinkan desain algoritma untuk permasalahan tertentu.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang disampaikan, ditemukan beberapa permasalahan yang harus diselesaikan pada *quantum computing*. Permasalah-permasalahan tersebut dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana membuat desain model algoritma *quantum computing* untuk menyelesaikan permasalahan *curse of dimensionality*?
2. Bagaimana pengaruh *noise* terhadap *quantum state*?

## 1.3 Tujuan dan Batasan Penelitian

### 1.3.1 Tujuan Penelitian

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk

1. Membuat sebuah model untuk *quantum computing* untuk menyelesaikan permasalahan *curse of dimensionality*
2. Analisis karakteristik *noise* dan mengusulkan solusi untuk mereduksi dalam *quantum state*

### 1.3.2 Batasan Penelitian

Untuk menghindari meluasnya permasalahan yang ada dalam domain yang diteliti, penulis membuat batasan masalah agar fokus dan penyelesaian masalah penelitian dapat tercapai. Batasan masalah dalam penelitian yang dilakukan adalah:

1. Penelitian berfokus pada pembangunan model komputasi kuantum
2. Penelitian tetap mempertimbangkan aspek akurasi selain kecepatan pemrosesan data
3. Dataset yang akan digunakan adalah data yang sudah ada

### 1.4 Kontribusi dan Manfaat Penelitian

Kontribusi penelitian merupakan sebuah model komputasi kuantum yang mampu mengatasi kutukan dimensi terutama untuk data berdimensi tinggi seperti gambar, audio, video, atau data-data yang perlu *deep analytics*. Adapun manfaat hasil penelitian adalah:

1. Model yang terbentuk dapat menjadi model yang mampu mengatasi kutukan dimensi terutama untuk data berdimensi tinggi

## BAB II

### TELAAH PUSTAKA

#### 2.1 *Dimensionality Reduction*

*Dimensionality reduction* merupakan salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengatasi masalah ekstraksi fitur dalam *high-dimensional data* dan seringkali merupakan bagian dari *pre-processing* untuk tujuan lain dalam sebuah penelitian. Tabel 2.1 mendeskripsikan beberapa penelitian terakhir yang mencoba untuk mengoptimasi teknik *dimensionality reduction*, misalnya dengan menggunakan *graph* secara paralel (Zheng, Zhao, Liu, Kong, Wang, Bi & Yi 2018), *projection learning* (Xie, Yin, Yin, Liu & Yin 2018), dan paradigma MapReduce yang digunakan untuk data yang heterogen (Gahar, Arfaoui, Hidri & Hadj-Alouane 2019). Walaupun metode *dimensionality reduction* mampu menyelesaikan beberapa masalah, namun metode *dimensionality reduction* menimbulkan masalah lain seperti adanya informasi selain *noise* yang hilang saat mereduksi dimensi data terutama jika membahas *big data* dan berdampak pada penurunan akurasi dalam pencarian informasi dan hal ini jarang dibuka dalam jurnal-jurnal penelitian.

Tabel 2.1: Beberapa Penelitian Terakhir Mengenai *Dimensionality Reduction*

Judul Penelitian	Tujuan	Metode
<i>Dimensionality Reduction via Multiple Locality-Constrained Graph Optimization</i> (Zheng et al. 2018)	Menggabungkan proses reduksi dimensi dengan pembangunan <i>graph</i> secara paralel	Menggunakan data masukan dari <i>graph</i> kemudian menambahkan <i>locality constraint</i> yang dimasukkan ke dalam fungsi objektif

Bersambung ke halaman berikutnya...



Tabel 2.1: Beberapa Penelitian (contd...)

Judul Penelitian	Tujuan	Metode
<i>Low Rank Sparse Preserving Projections for Dimesionalilty Reduction</i> (Xie et al. 2018)	Mengurangi pengaruh <i>noise</i> pada data dengan menggabungkan <i>manifold learning</i> dan <i>low-rank sparse presentation</i>	Mengintegrasikan properti <i>low-rank sparse</i> ke dalam <i>projection learning</i> untuk mengekstraksi fitur diikuti dengan <i>linearized alternating direction method with adaptive penalty</i>
<i>A Distributed Approach for High-Dimensionality Heterogeneous Data Reduction</i> (Gahar et al. 2019)	Memperkenalkan pendekatan statistik terdistribusi untuk reduksi dimensi tinggi dari data yang heterogen berbasis paradigma MapReduce, membatasi kutukan dimensi, dan mengatasi nilai yang hilang	Setelah melakukan data <i>preprocessing</i> dengan membersihkan data yang hilang, kemudian data akan dipisahkan berdasarkan data kuantitatif atau kualitatif, hasil pemisahan akan menjadi data masukan untuk algoritma MapReduce.

## 2.2 Multidimensional Indexing

*Multidimensional indexing* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk pencarian data dalam *high-dimensional data*, namun metode ini mulai ditinggalkan dalam penelitian-penelitian terbaru karena memiliki masalah dalam penentuan node awal, karena jika salah dalam menentukan node awal, maka kompleksitas akan meningkat secara signifikan, selain itu, pembentukan pohon memerlukan tempat di memori yang cukup besar, sehingga sangat terbatas dan seringkali tidak dapat menemui titik optimalnya. Untuk mengatasi hal ini, beberapa penelitian mencoba untuk menggabungkan struktur-struktur tersebut dengan teknik pemrograman paralel dalam arsitektur GPU (Kim, Jeong & Nam 2015)(Ahmed & Sarma 2018)(Sprenger, Schafer & Leser 2019). Tabel 2.2 mendeskripsikan beberapa peneli-

tian terakhir yang mencoba untuk mengoptimasi teknik *multidimensional indexing*.

Tabel 2.2: Beberapa Penelitian Terakhir Mengenai *Multimedimensional Indexing*

Judul Penelitian	Tujuan	Metode
<i>Exploiting Massive Parallelism for Indexing Multi-dimensional Datasets on the GPU</i> (Kim et al. 2015)	Memperkenalkan sebuah algoritma untuk menelusuri pohon secara paralel untuk menangani data yang besar dan menghindari rekursi dan akses memori yang tidak biasa dalam GPU	Memeriksa satu node pohon pada setiap tahap untuk setiap blok, menghindari rekursi atau operasi stack dengan mengulang kembali penelusuran pohon dan menghindari node yang sudah dikunjungi dengan memeriksa index pohon terbesar yang pernah dikunjungi, dan mengakses <i>memory block</i> yang paling dekat dengan memindai node daun
<i>Locality Sensitive Hashing Based Space Partitioning Approach for Indexing Multidimensional Feature Vectors of Fingerprint Image Data</i> (Ahmed & Sarma 2018)	Memperkenalkan mekanisme pemberian indeks yang membagi data ke dalam zona dan blok menggunakan fungsi hash	Membagi data ke dalam zona dan blok menggunakan fungsi hash, kemudian membuat indeks berdasarkan zona dan blok data dengan lokasi indeks dibagi menjadi maksimum 9 sub-lokasi penyimpanan data untuk mengefisienkan pencarian data dan meminimalkan kesalahan penerimaan dan penolakan

Tabel 2.2: Beberapa Penelitian (contd...)

Judul Penelitian	Tujuan	Metode
<i>BB-Tree: A main-memory index structure for multidimensional range queries</i> (Sprenger et al. 2019)	Memperkenalkan MDIS (multidimensional index structure) yang dapat menangani exact-match dan range-queries secara efisien, penggunaan memori yang rendah	BB-Tree menggunakan k-ary search tree yang hampir seimbang sebagai dasar, kemudian menggunakan bubble bucket(BB) yang dapat dibangun kembali saat jumlah data yang masuk terlalu penuh

### 2.3 Quantum Computing

*Quantum computing* merupakan sebuah teknologi baru yang menjanjikan sebuah potensi untuk menyelesaikan komputasi yang kompleks. Tantangan utama dalam *quantum computing* adalah infrastruktur untuk *quantum computer* yang belum mampu dibangun untuk skala industri karena masih sulit untuk mendesain dan memverifikasi akurasi dari hasil komputasinya, dikarenakan ketidakstabilan quantum state yang sangat sensitif dan dipengaruhi oleh lingkungannya, sehingga penentuan *error correction*, pembentukan qubits dan pengujian sulit dilakukan karena perubahan kecil dalam suatu qubits akan mengakibatkan perubahan yang cukup besar dalam sistem secara keseluruhan (Franklin & Chong 2004). Survei yang dilakukan oleh (Li, Tian, Liu, Peng & Jiao 2020) menunjukkan bahwa algoritma kuantum menunjukkan daya saing yang kuat dan memiliki potensi besar untuk penelitian selanjutnya. Beberapa penelitian terakhir mencoba untuk menggunakan channel untuk menentukan qubits state (Kechrimparis, Kropf, Wudarski & Bae 2020) (Fang, Wang, Tomamichel & Berta 2020), dan menggunakan algoritma kuantum untuk mengoptimasi algoritma pencarian (Kuo & Chou 2017) (Botsinis, Alanis, Babar, Nguyen, Chandra, Ng & Hanzo 2019). Tabel 2.3 memberikan gambaran masalah dan diskusi dari beberapa penelitian terakhir mengenai *quantum computing*

Tabel 2.3: Beberapa Penelitian Terakhir Mengenai *Quantum Computing*

Judul Penelitian	Tujuan	Hasil
<i>Entanglement-Enhanced Quantum-Inspired Tabu Search Algorithm for Function Optimization</i> (Kuo & Chou 2017)	Mengoptimasi algoritma quantum-inspired tabu search (QTS) dan mempercepat proses optimasi	Menggunakan algoritma QTS sebagai dasar, kemudian menambahkan ketergantungan variabel, pencarian lokal, dan quantum NOT gate untuk keluar dari optima local menghasilkan algoritma Entanglement-QTS
<i>Quantum Search Algorithms for Wireless Communications</i> (Botsinis et al. 2019)	Menyelidiki penggunaan <i>quantum computing</i> untuk menyelesaikan masalah dalam sistem komunikasi nirkabel dan masalah optimasi yang ditemui baik di lapisan fisik maupun jaringan komunikasi nirkabel	Melakukan analisis terhadap beberapa algoritma kuantum yang sudah dipublikasikan, kemudian mencoba mencari solusi yang suboptimal karena faktor biaya yang sangat besar untuk mencari solusi yang paling optimal
<i>Quantum Searchable Encryption for Cloud Data Based on Full-Blind Quantum Computation</i> (Liu, Xu, Liu, Wang & Lei 2019)	Mencari data yang terenkripsi di dalam cloud dengan menggabungkan FBQC ( <i>Full-blind quantum computing</i> ) dengan algoritma pencarian Grover	Mampu menyelesaikan permasalahan pencarian data terenkripsi untuk multi-client tanpa mengungkapkan data aslinya, dan juga mampu bertahan dari serangan internal dan eksternal

Bersambung ke halaman berikutnya...

Tabel 2.3: Beberapa Penelitian (contd...)

Judul Penelitian	Tujuan	Hasil
<i>Efficient Teleportation for High-Dimensional Quantum Computing</i> (Xu, Wang & Wang 2019)	Mencari kemungkinan mencapai skema yang efisien dari komputasi kuantum dimensi tinggi nonlokal dengan menggunakan pasangan foton hyperentangled, atom, dan sistem gabungan resonator mikro optik	Menghasilkan skema untuk komputasi kuantum nonlokal, yang dapat digunakan untuk komunikasi kuantum jarak jauh, tetapi masih memerlukan penelitian lebih lanjut untuk meneliti mengenai noise dari lingkungan
<i>Channel Coding of a Quantum Measurement</i> (Kechrimparis et al. 2020)	Memberikan landasan untuk melakukan pengukuran interaksi sistem kuantum dengan lingkungannya	Channel coding dapat mengisolasi sebuah qubits dari lingkungannya, tetapi masih perlu penelitian lebih lanjut jika dilakukan dengan lingkungan yang dipengaruhi noise

Bersambung ke halaman berikutnya...

Tabel 2.3: Beberapa Penelitian (contd...)

Judul Penelitian	Tujuan	Hasil
<i>Quantum Channel Simulation and the Channel's Smooth Max-Information</i> (Fang et al. 2020)	Menyelidiki kemungkinan mencapai skema yang efisien dari <i>quantum computing</i> dimensi tinggi nonlokal dengan menggunakan pasangan foton hyperentangled, atom, dan sistem gabungan resonator mikro optic, dengan melakukan simulasi channel kuantum dalam one-shot dan asymptotic regimes	Untuk komputasi kuantum nonlokal, operasi kuantum dimensi tinggi berkinerja lebih baik daripada metode tradisional yang menguraikan ruang Hilbert berdimensi tinggi menjadi ruang kuantum dua dimensi di bawah sumber daya yang dibatasi secara maksimal yang dibagi sebelumnya, selain itu memberikan arah penelitian untuk simulasi <i>quantum computing</i> dengan menggunakan one-shot NS-assisted <i>quantum simulation</i> dan channel's smooth max-information

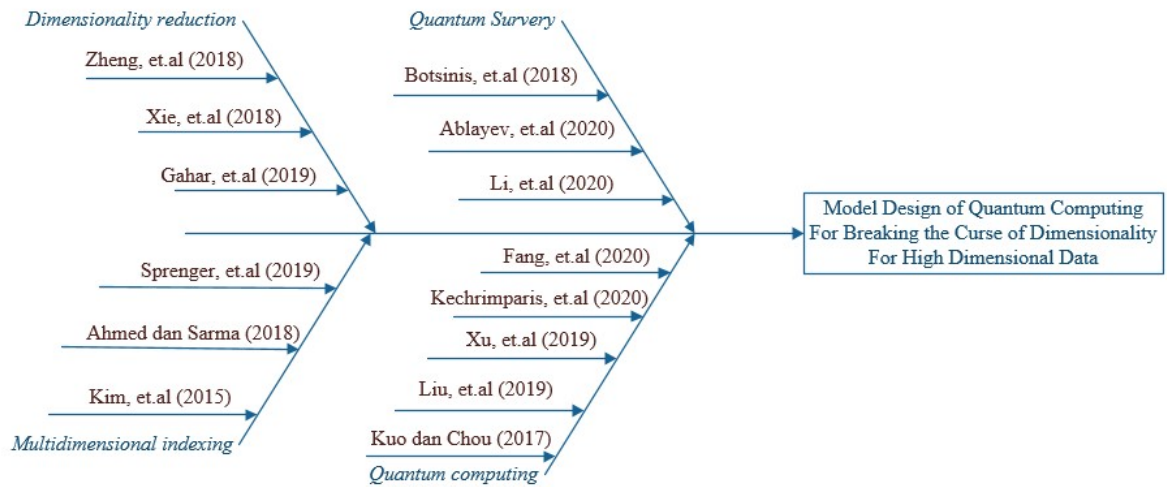
Bersambung ke halaman berikutnya...

Tabel 2.3: Beberapa Penelitian (contd...)

Judul Penelitian	Tujuan	Hasil
<i>Quantum On Quantum Methods for Machine Learning Problems Part I: Quantum Tools</i> (Ablayev, Ablayev, Huang, Khadiev, Salikhova & Wu 2019)	Memperkenalkan alat kuantum penting berdasarkan algoritma pencarian kuantum dan uji SWAP yang diketahui, dan membahas prosedur kuantum dasar yang digunakan untuk metode pencarian kuantum	Menyajikan metode kuantum dasar, seperti pencarian kuantum Grover dan variannya sebagai alat fundamental. Kemudian mendemonstrasikan bagaimana alat kuantum ini dapat berguna untuk mempercepat komputasi masalah klasifikasi
<i>Quantum Optimization and Quantum Learning: A Survey</i> (Li, Tian, Liu, Peng & Jiao 2020)	Membahas terobosan besar dalam pengembangan domain kuantum, kemudian merangkum algoritma kuantum yang ada dari dua aspek: optimasi kuantum dan pembelajaran kuantum	Dibandingkan dengan algoritma cerdas tradisional, algoritma cerdas kuantum telah menunjukkan daya saing yang kuat dan memiliki potensi besar

## 2.4 Perbandingan Telaah Pustaka

Melalui telaah penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, peneliti dapat mengembangkan sebuah penelitian baru yang bisa melengkapi apa yang belum dikerjakan oleh para peneliti pendahulu.

Gambar 2.1: *State-of-the-art*

Dari studi literatur terhadap jurnal-jurnal yang ada, dapat dilihat bahwa usaha untuk mengatasi besarnya dimensi data telah dilakukan dengan berbagai metode yang dapat dikategorikan menjadi dua kategori yaitu dimensional reduction dan multidimensional data. Dimensional reduction menimbulkan masalah lain seperti adanya informasi selain noise yang hilang saat mereduksi dimensi data terutama jika membahas big data dan berdampak pada penurunan akurasi dalam pencarian informasi dan hal ini jarang dibuka dalam jurnal penelitian, sedangkan struktur tree sudah mulai ditinggalkan dalam penelitian-penelitian terbaru pada saat membahas multidimensional data ketika fungsi hash yang digunakan tidak tepat sasaran, karena kesalahan dalam menentukan node awal akan berakibat meningkatnya kompleksitas algoritma. Beberapa penelitian menggabungkan struktur-struktur tersebut dengan teknik pemrograman paralel dalam arsitektur GPU.

Quantum computing merupakan terobosan baru untuk meningkatkan performansi suatu algoritma dan beberapa penelitian menunjukkan bahwa dengan mengimplementasikan quantum computing ke dalam algoritma klasik yang sudah ada, dapat meningkatkan performa algoritma menjadi jauh lebih cepat.

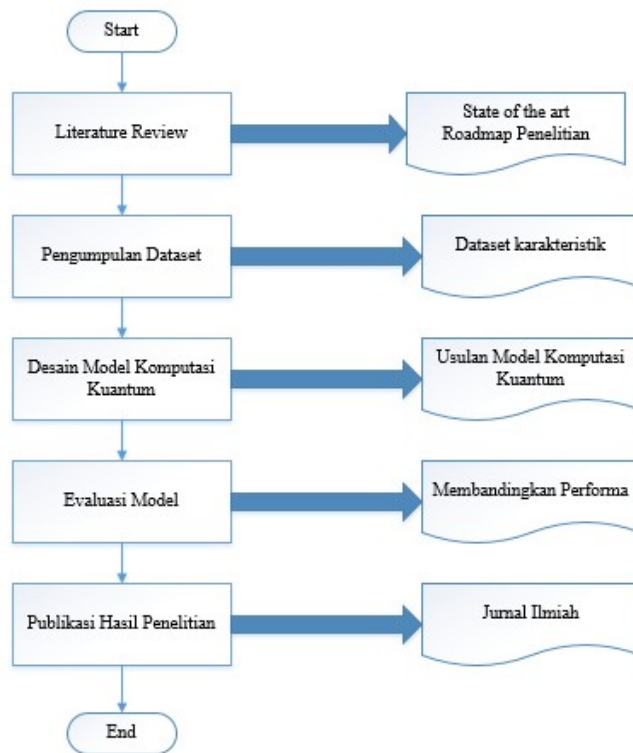


## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Gambaran Umum Penelitian

Secara umum penelitian akan dilakukan dengan melakukan literature review terhadap penelitian yang sudah ada, kemudian mengumpulkan dataset dari penelitian yang sudah ada untuk melakukan perbandingan, kemudian mengusulkan model komputasi kuantum dan melakukan perbandingan performa dengan penelitian lain.



Gambar 3.1: Tahapan Penelitian

1. *Literature Review* bertujuan untuk menghasilkan sebuah *state-of-the-art* dan roadmap penelitian
2. Pengumpulan dataset, bertujuan untuk mengumpulkan dataset karakteristik data berdimensi tinggi yang pernah digunakan dalam penelitian sebelumnya sehingga dapat dilakukan perbandingan data dengan penelitian sebelumnya

- 
3. Desain model komputasi kuantum, bertujuan untuk membentuk satu atau beberapa model usulan
  4. Evaluasi model, bertujuan untuk melakukan evaluasi model dengan membandingkan performa dengan penelitian lain
  5. Publikasi hasil penelitian dalam bentuk jurnal

## DAFTAR PUSTAKA

- Ablayev, F., Ablayev, M., Huang, J. Z., Khadiev, K., Salikhova, N. & Wu, D. (2019), ‘On quantum methods for machine learning problems part I: Quantum tools’, *Big Data Mining and Analytics* **3**(1), 41–55.
- Ahmed, T. & Sarma, M. (2018), ‘Locality sensitive hashing based space partitioning approach for indexing multidimensional feature vectors of fingerprint image data’, *IET Image Processing* **12**(6), 1056–1064.
- Bhattacharyya, S., Pal, P. & Bhowmik, S. (2014), A quantum multilayer self organizing neural network for object extraction from a noisy background, *in* ‘Proceedings - 2014 4th International Conference on Communication Systems and Network Technologies, CSNT 2014’, IEEE Computer Society, pp. 512–517.
- Botsinis, P., Alanis, D., Babar, Z., Nguyen, H. V., Chandra, D., Ng, S. X. & Hanzo, L. (2019), ‘Quantum Search Algorithms for Wireless Communications’, *IEEE Communications Surveys and Tutorials* **21**(2), 1209–1242.
- Campese, S., Lauriola, I., Scarpazza, C., Sartori, G. & Aiolfi, F. (2020), Psychiatric Disorders Classification with 3D Convolutional Neural Networks, *in* D. Oneto, Luca; Navarin, Nicolò; Sperduti, Alessandro; Anguita, ed., ‘Recent Advances in Big Data and Deep Learning (Proceedings of the INNS Big Data and Deep Learning Conference)’, 1 edn, Springer, Cham, chapter 6, pp. 48–57.
- Costilla-Reyes, O., Vera-Rodriguez, R., Alharthi, A. S., Yunas, S. U. & Ozanyan, K. B. (2020), Deep Learning in Gait Analysis for Security and Healthcare, *in* S.-M. Pedrycz, Witold; Chen, ed., ‘Deep Learning: Algorithms and Applications’, Vol. 865, Springer, Cham, chapter 10, pp. 299–334.
- Fang, K., Wang, X., Tomamichel, M. & Berta, M. (2020), ‘Quantum channel simulation and the channel’s smooth max-information’, *IEEE Transactions on Information Theory* **66**(4), 2129–2140.
- Franklin, D. & Chong, F. T. (2004), CHALLENGES IN RELIABLE QUANTUM COMPUTING, Technical report.

- Gahar, R. M., Arfaoui, O., Hidri, M. S. & Hadj-Alouane, N. B. (2019), ‘A Distributed Approach for High-Dimensionality Heterogeneous Data Reduction’, *IEEE Access* **7**, 151006–151022.
- Hu, L. & Ni, Q. (2019), Quantum automated object detection algorithm, in ‘ICAC 2019 - 2019 25th IEEE International Conference on Automation and Computing’, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Huang, Y., Chai, Y., Liu, Y. & Shen, J. (2019), ‘Architecture of next-generation e-commerce platform’, *Tsinghua Science and Technology* **24**(1), 18–29.
- Jin, Z., Hou, Z., Yu, W. & Wang, X. (2018), ‘Target tracking approach via quantum genetic algorithm’, *IET Computer Vision* **12**(3), 241–251.
- Kechrimparis, S., Kropf, C. M., Wudarski, F. & Bae, J. (2020), ‘Channel Coding of a Quantum Measurement’, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* **38**(3), 439–448.
- Kim, J., Jeong, W. K. & Nam, B. (2015), ‘Exploiting Massive Parallelism for Indexing Multi-Dimensional Datasets on the GPU’, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* **26**(8), 2258–2271.
- Kuo, S. Y. & Chou, Y. H. (2017), ‘Entanglement-Enhanced Quantum-Inspired Tabu Search Algorithm for Function Optimization’, *IEEE Access* **5**, 13236–13252.
- Lebichot, B., Borgne, Y.-A. L., He-Guelton, L., Oblé, F. & Bontempi, G. (2019), Deep-Learning Domain Adaptation Techniques for Credit Cards Fraud Detection, in ‘Recent Advances in Big Data and Deep Learning (Proceedings of the INNS Big Data and Deep Learning Conference)’, Springer, Cham, pp. 78–88.
- Li, Y., Tian, M., Liu, G., Peng, C. & Jiao, L. (2020), ‘Quantum optimization and quantum learning: A survey’, *IEEE Access* **8**, 23568–23593.
- Liu, W., Xu, Y., Liu, W., Wang, H. & Lei, Z. (2019), ‘Quantum searchable encryption for cloud data based on full-blind quantum computation’, *IEEE Access* **7**, 186284–186295.

- Lu, H. H., Weiner, A. M., Lougovski, P. & Lukens, J. M. (2019), ‘Quantum Information Processing with Frequency-Comb Qudits’, *IEEE Photonics Technology Letters* **31**(23), 1858–1861.
- Misra, R. & Ray, K. S. (2018), Object Tracking based on Quantum Particle Swarm Optimization, in ‘2017 9th International Conference on Advances in Pattern Recognition, ICAPR 2017’, IEEE, pp. 292–297.
- Pedrycz, W. & Chen, S.-M. (2020), *Studies in Computational Intelligence 865 Deep Learning: Algorithms and Applications*, Springer.
- Russo, A. S. & Alturas, B. (2017), Online service perceived value travel and holiday accomodation context, in ‘2017 12th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)’, pp. 1–6.
- Song, D., He, C., Cao, Z. & Chai, G. (2018), ‘Quantum Teleportation of Multiple Qubits Based on Quantum Fourier Transform’, *IEEE Communications Letters* **22**(12), 2427–2430.
- Sprenger, S., Schafer, P. & Leser, U. (2019), ‘bb-tree: A main-memory index structure for multidimensional range queries’, in ‘Proceedings International Conference on Data Engineering’, pp. 1566–1569.
- Sun, B., Wang, B., Shi, Y. & Gao, H. (2015), Visual tracking using quantum-behaved particle swarm optimization, in ‘Chinese Control Conference, CCC’, Vol. 2015-Septe, pp. 3844–3851.
- Xie, L., Yin, M., Yin, X., Liu, Y. & Yin, G. (2018), ‘Low-Rank Sparse Preserving Projections for Dimensionality Reduction’, *IEEE Transactions on Image Processing* **27**(11), 5261–5274.
- Xu, W.-L., Wang, T.-J. & Wang, C. (2019), ‘Efficient Teleportation for High-Dimensional Quantum Computing’, *IEEE Access* **7**, 115331–115338.
- Yan, Y., Hao, H., Xu, B., Zhao, J. & Shen, F. (2020), ‘Image Clustering via Deep Embedded Dimensionality Reduction and Probability-Based Triplet Loss’, *IEEE Transactions on Image Processing* **29**, 5652–5661.

- 
- Yu, J., Sun, J., Liu, S., Luo, S. & Ou, H. (2017), Monocular 3D human motion analysis using quantum-behaved clonal algorithm, *in* ‘2017 9th IEEE International Conference on Communication Software and Networks, ICCSN 2017’, Vol. 2017-Janua, pp. 1261–1265.
- Zgurovsky, M. Z. & Zaychenko, Y. P. (2020), *Big Data: Conceptual Analysis and Applications*, 58 edn, Springer, Kyiv.
- Zheng, C., Zhao, R., Liu, F., Kong, J., Wang, J., Bi, C. & Yi, Y. (2018), ‘Dimensionality reduction via multiple locality-constrained graph optimization’, *IEEE Access* **6**, 54479–54494.