

**DETEKSI ANOMALI PADA SINYAL VIBRASI  
BERBASIS VARIATIONAL AUTOENCODER**



**OLEH:  
ZAINAL UMARI  
09012682327002**

**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU KOMPUTER  
FAKULTAS ILMU KOMPUTER  
UNIVERSITAS SRIWIJAYA  
2024**

# **DETEKSI ANOMALI PADA SINYAL VIBRASI BERBASIS VARIATIONAL AUTOENCODER**

**TESIS**

**Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Magister**



**OLEH:  
ZAINAL UMARI  
09012682327002**

**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU KOMPUTER  
FAKULTAS ILMU KOMPUTER  
UNIVERSITAS SRIWIJAYA  
2024**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**DETEKSI ANOMALI PADA SINYAL VIBRASI  
BERBASIS VARIATIONAL AUTOENCODER**

**TESIS**

Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Magister

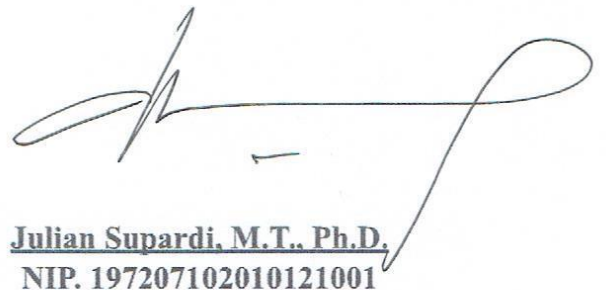
**OLEH:**  
**ZAINAL UMARI**  
**09012682327002**

**Mengetahui**  
**Koordinator Program Studi**  
**Magister Ilmu Komputer**



**Dr. Firdaus, M.Kom.**  
**NIP. 197801212008121003**

**Palembang, 31 Desember 2024**  
**Menyetujui**  
**Pembimbing I**

A handwritten signature in black ink, which appears to be "Julian Supardi". The signature is fluid and extends across the width of the page.

**Julian Supardi, M.T., Ph.D.**  
**NIP. 197207102010121001**

## HALAMAN PERSETUJUAN

Pada hari Selasa tanggal 31 Desember 2024 telah dilaksanakan ujian sidang tesis oleh Magister Ilmu Komputer Fakultas Ilmu Komputer Universitas Sriwijaya.

Nama : Zainal Umari

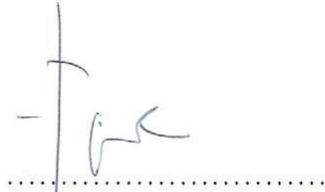
NIM : 09012682327002

Judul : Deteksi Anomali pada Sinyal Vibrasi Berbasis Variational Autoencoder

1. Ketua Penguji

Dr. Firdaus, M.Kom.

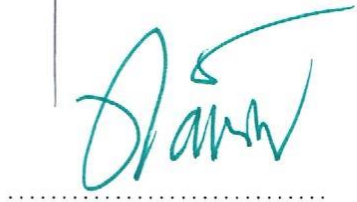
NIP. 196904121995021001



2. Penguji I

Samsuryadi, M.Kom., Ph.D.

NIP. 197102041997021003



3. Penguji II

Dr. Ir. Sukemi, M.T.

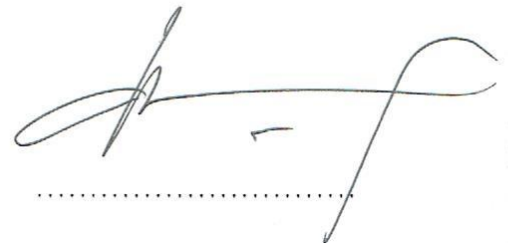
NIP. 196612032006041001



4. Pembimbing I

Julian Supardi, M.T., Ph.D.

NIP. 197207102010121001



Mengetahui,  
Koordinator Program Studi Magister Ilmu Komputer



Dr. Firdaus, M.Kom.  
NIP. 197801212008121003

## LEMBAR PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Zainal Umari  
NIM : 09012682327002  
Program Studi : Magister Ilmu Komputer  
Judul Tesis : Deteksi Anomali Pada Sinyal Berbasis Variational Autoencoder

Hasil Pengecekan Software iThenticate/Turnitin : 14 %

Menyatakan bahwa laporan tesis saya merupakan hasil karya sendiri dan bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam laporan tesis ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian, pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya dan tidak ada paksaan oleh siapapun.



Palembang, 23 Desember 2024



Zainal Umari

NIM. 09012682327002

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin. Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang tak henti-hentinya selalu memberikan karunia, petunjuk, kekuatan, dan pertolongan kepada penulis. Berkat dan rahmat dan ridha-Nya, penulis akhirnya dapat menyelesaikan penyusunan tesis ini dengan baik.

Tesis ini tidak hanya mencerminkan sebuah penelitian ilmiah, tetapi juga perjalanan dalam memahami kompleksitas data, menggali solusi inovatif, dan menghadapi berbagai dinamika selama proses penyusunan. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada pihak-pihak yang telah memberikan kontribusi, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam mendukung penelitian ini:

1. Bapak Julian Supardi, M.T., Ph.D., selaku pembimbing utama, atas kebijaksanaan dan bimbingan yang tidak hanya membentuk kerangka penelitian ini, tetapi juga menginspirasi pemahaman yang lebih dalam tentang ilmu pengetahuan.
2. Ibu Dian Palupi Rini, M.Kom., Ph.D., selaku pembimbing akademik yang telah memberikan dukungan akademik selama masa perkuliahan dan membantu penulis untuk tetap fokus pada penyelesaian studi ini.
3. Bapak Dr. Firdaus, M.Kom, selaku Koordinator Program Studi Magister Ilmu Komputer, Universitas Sriwijaya, atas arahannya yang mendukung keberhasilan studi ini.
4. Seluruh Dosen dan Staff Program Studi Magister Ilmu Komputer, Universitas Sriwijaya, atas dukungan fasilitas dan ilmu yang telah diberikan selama masa studi ini.
5. Keluarga tercinta, istri Melly Delima, serta anak-anak Ahmad Habibi Alkhawarizmi, Nidaan Khofiyya, dan Ahmad Fathan Albiruni, yang menjadi pilar kekuatan, sumber inspirasi, serta motivasi terbesar untuk terus melangkah dan menyelesaikan studi ini.

6. PT. Pusri Palembang, khususnya Bapak Ahmad Gunawan selaku VP Keandalan Pabrik dan Bapak M. Hilal Amsori selaku Senior Engineer Condition Monitoring, atas dukungan dan kesempatan yang diberikan untuk melaksanakan studi ini.
7. Para sahabat seperjuangan, Dite Geovani, Agus Andreansyah, Nurul Hijriani, Gabriel Mediose Alfranda Sihotang, dan teman lainnya, yang telah menjadi tempat berbagi ide, keluh kesah, dan tawa di tengah perjalanan ini.

Penelitian ini berfokus pada penerapan *machine learning* untuk mendeteksi anomali dalam data vibrasi, sebuah topik yang menggabungkan tantangan teknis dengan relevansi praktis yang luas. Penulis percaya bahwa eksplorasi ini tidak hanya memperkaya wawasan akademik, tetapi juga membuka peluang baru untuk aplikasi nyata di dunia industri.

Penulis menyadari bahwa hasil dari penelitian ini masih memiliki banyak keterbatasan. Namun, penulis berharap karya ini dapat menjadi pijakan awal untuk penelitian lanjutan dan memberikan manfaat yang berarti bagi pembaca, praktisi, maupun akademisi.

Dengan kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan dan perhatian yang telah diberikan. Semoga tesis ini dapat memberikan kontribusi yang bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Palembang, 31 Desember 2024

Zainal Umari

# Deteksi Anomali pada Sinyal Vibrasi Berbasis Variational Autoencoder

Zainal Umari

## Abstrak

Analisis sinyal vibrasi telah lama diandalkan dalam berbagai industri sebagai metode untuk mendeteksi anomali yang berpotensi menyebabkan kerusakan serius. Namun, tingginya resolusi data dan ketiadaan label membuat deteksi anomali pada sinyal vibrasi sulit dilakukan dengan metode tradisional. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model *Variational Autoencoder* (VAE) yang mampu mendeteksi anomali pada sinyal vibrasi beresolusi tinggi tanpa memerlukan pelabelan data. Data yang digunakan diperoleh dari tiga unit mesin blower identik di PT. Pusri Palembang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model VAE yang dikembangkan mampu mendeteksi anomali dengan akurasi tinggi, menjadikannya solusi yang andal dalam pemantauan kondisi mesin. Penelitian ini menawarkan pendekatan praktis bagi industri untuk meningkatkan efisiensi pemeliharaan dan keandalan peralatan.

**Kata kunci:** analisis sinyal vibrasi, deteksi anomali, pembelajaran tanpa pengawasan, *variational autoencoder*



# Vibration Signal Anomaly Detection Using Variational Autoencoder

Zainal Umari

## Abstract

Vibration signal analysis has long been relied upon in various industries as a method to detect anomalies that could potentially lead to serious damage. However, the high resolution of data and the absence of labels make anomaly detection in vibration signals challenging with traditional methods. This study aims to develop a Variational Autoencoder (VAE) model capable of detecting anomalies in high-resolution vibration signals without requiring labeled data. The data used were obtained from three identical blower units at PT. Pusri Palembang. The results of the study indicate that the developed VAE model can detect anomalies with high accuracy, making it a reliable solution for machine condition monitoring. This research offers a practical approach for industries to enhance maintenance efficiency and equipment reliability.

**Keywords:** anomaly detection, unsupervised learning, variational autoencoder, vibration analysis

# DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
Halaman Judul	i
Halaman Pengesahan	ii
Halaman Persetujuan	iii
Halaman Pernyataan	iv
Kata Pengantar	v
Abstrak	vii
Abstarct	viii
Daftar Isi	ix
Daftar Gambar	xii
Daftar Tabel	xiv
Daftar Singkatan	xv
Daftar Lampiran	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Analisa Vibrasi	5
2.2 <i>Autoencoders</i>	7
2.2.1 <i>Arsitektur Autoencoder</i>	7
2.2.2 <i>Loss Function Autoencoder</i>	9

2.2.3	Penerapan <i>Autoencoder</i> dalam Deteksi Anomali	10
2.3	Variational Autoencoder (VAE)	10
2.3.1	Arsitektur VAE	10
2.2.2	<i>Loss Function VAE</i>	12
2.2.3	Penerapan VAE dalam Deteksi Anomali	13
2.4	Evaluasi	14
BAB III METODE PENELITIAN		17
3.1	Tahapan Penelitian	17
3.2	Pengumpulan Data	18
3.3	Pembersihan Data	20
3.4	Pembagian Data	21
3.5	Pembuatan Model	21
3.5.1	Eksperimen Hiperparameter	22
3.5.2	Kriteria Evaluasi	23
3.6	Pelabelan Data	23
3.7	Evaluasi	23
BAB IV HASIL DAN ANALISA		25
4.1	Deskripsi Data	25
4.2	Pembersihan Data	27
4.2.1	Pembersihan Data Berdasarkan <i>Point Path</i>	27
4.2.2	Pembersihan Data Berdasarkan <i>Lines</i>	29
4.2.3	Pembersihan Data Berdasarkan <i>End Frequency</i>	30
4.3	Pembagian Data	31
4.4	Eksperimen Arsitektur	32
4.4.1	Eksperimen <i>Hidden Layer</i> dan Dimensi Laten	32
4.4.2	Eksperimen Fungsi Aktivasi	34
4.4.3	Eksperimen Algoritma Optimasi dan <i>Learning Rate</i>	36
4.5	Pembuatan Model	37

4.6 Pelabelan Data Uji	37
4.7 Evaluasi	39
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	44
5.1 Kesimpulan	44
5.2 Saran	44
Daftar Pustaka	46

## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
<b>Gambar 2.1</b> Diagram proses analisa vibrasi	5
<b>Gambar 2.2</b> Perbandingan sinyal vibrasi	6
<b>Gambar 2.3</b> Arsitektur sederhana <i>autoencoder</i>	8
<b>Gambar 2.4</b> Diagram struktur VAE	11
<b>Gambar 3.1</b> Alur tahapan penelitian	17
<b>Gambar 3.2</b> Alat ukur vibrasi portabel SKF Microlog Analyzer GX	18
<b>Gambar 3.3</b> Perangkat lunak SKF @ptitude Analyst	19
<b>Gambar 3.4</b> Contoh sinyal vibrasi dari perangkat lunak SKF @ptitude Analyst	20
<b>Gambar 3.5</b> Rencana pembagian data berbasis waktu	21
<b>Gambar 3.6</b> Arsitektur umum VAE	22
<b>Gambar 4.1</b> Contoh data sinyal vibrasi	26
<b>Gambar 4.2</b> Distribusi pengukuran terhadap waktu	27
<b>Gambar 4.3</b> Distribusi <i>point path</i> sebelum proses pembersihan	28
<b>Gambar 4.4</b> Distribusi <i>point path</i> setelah proses pembersihan	29
<b>Gambar 4.5</b> Distribusi nilai <i>lines</i> sebelum proses pembersihan	29
<b>Gambar 4.6</b> Distribusi nilai <i>end frequency</i> sebelum proses pembersihan	30
<b>Gambar 4.7</b> Distribusi <i>point path</i> pada data	31
<b>Gambar 4.8</b> Distribusi data berdasarkan waktu	32
<b>Gambar 4.9</b> Negatif ELBO pada berbagai kombinasi <i>hidden layer</i> dan dimensi laten	33
<b>Gambar 4.10</b> Negatif ELBO pada fungsi aktivasi	35
<b>Gambar 4.11</b> Negatif ELBO pada berbagai kombinasi algoritma optimasi dan <i>learning rate</i>	36

<b>Gambar 4.12</b> Negatif ELBO per- <i>epoch</i> dari pelatihan model	37
<b>Gambar 4.13</b> Sampel data normal	38
<b>Gambar 4.14</b> Sampel data anomali	38
<b>Gambar 4.15</b> Perbandingan nilai <i>accuracy</i> , <i>precision</i> , <i>recall</i> , dan F1- <i>score</i> terhadap <i>threshold</i>	39
<b>Gambar 4.16</b> <i>Confusion matrix</i> hasil evaluasi model	40
<b>Gambar 4.17</b> Data vibrasi pertama yang salah diklasifikasikan oleh model	40
<b>Gambar 4.18</b> Data vibrasi kedua yang salah diklasifikasikan oleh model	41
<b>Gambar 4.19</b> ROC <i>curve</i> hasil evaluasi model	42

## DAFTAR TABEL

	<b>Halaman</b>
<b>Tabel 3.1</b> Parameter pengukuran vibrasi menggunakan SKF Microlog Analyzer	19
<b>Tabel 4.1</b> Contoh parameter pengukuran vibrasi	25
<b>Tabel 4.2</b> Contoh 10 resolusi data pertama sinyal vibrasi	25
<b>Tabel 4.3</b> Contoh 10 resolusi data terakhir sinyal vibrasi	25
<b>Tabel 4.4</b> Ringkasan statistik data pengukuran vibrasi	26
<b>Tabel 4.5</b> Penjelasan <i>point path</i> pada data pengukuran vibrasi	27
<b>Tabel 4.6</b> Kombinasi dimensi pada hidden layer	32

## DAFTAR SINGKATAN

AUC	<i>Area Under Curve</i>
BCE	<i>Binary Cross-Entropy</i>
ELBO	<i>Evidence Lower Bound</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FN	<i>False Negative</i>
FP	<i>False Positive</i>
FPR	<i>False Positive Rate</i>
GANs	<i>Generative Adversarial Networks</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
KL	<i>Kullback-Leibler</i>
LHC	<i>Large Hadron Collider</i>
MSE	<i>Mean Squared Error</i>
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
ReLU	<i>Rectified Linear Unit</i>
RMSprop	<i>Root Mean Square Propagation</i>
RNN	<i>Recurrent Neural Networks</i>
ROC	<i>Receiver Operating Characteristic</i>
SGD	<i>Stochastic Gradient Descent</i>
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
TN	<i>True Negative</i>
TP	<i>True Positive</i>
TPR	<i>True Positive Rate</i>
VAE	<i>Variational Autoencoder</i>



## DAFTAR LAMPIRAN

	<b>Halaman</b>
<b>Lampiran 1</b> Contoh data hasil pengukuran vibrasi	50
<b>Lampiran 2</b> Publikasi ilmiah	59

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Analisis sinyal vibrasi telah lama diandalkan dalam berbagai industri sebagai metode pemantauan kondisi kesehatan mesin (Goyal dan Pabla, 2016). Metode ini dinilai efektif karena perubahan pola vibrasi sering kali menjadi tanda awal adanya anomali, seperti kerusakan mekanis atau penurunan kinerja komponen (Ghazali dan Rahiman, 2021). Deteksi dini terhadap gejala anomali tersebut sangat penting untuk meminimalkan potensi kegagalan mesin yang lebih serius, sehingga waktu henti operasional (*downtime*) yang merugikan dapat dicegah (Zonta dkk., 2020). Oleh sebab itu, pengembangan metode deteksi anomali yang efektif untuk sinyal vibrasi semakin menjadi kebutuhan utama di industri modern.

Namun, upaya deteksi anomali pada sinyal vibrasi masih menghadapi sejumlah tantangan. Salah satunya adalah sifat data vibrasi yang umumnya beresolusi tinggi dan tidak berlabel. Proses pelabelan data memerlukan intervensi manusia, yang tidak hanya memakan biaya dan waktu, tetapi juga memerlukan keahlian khusus untuk menjamin konsistensinya. Selain itu, teknik tradisional kerap kali mengalami kesulitan dalam mengidentifikasi anomali yang tersembunyi di dalam data berskala besar (G. Li dan Jung, 2023). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih canggih dan adaptif untuk mengatasi kendala ini.

Salah satu alternatif yang berpotensi mengatasi permasalahan tersebut adalah *Variational Autoencoder* (VAE), sebuah pendekatan pembelajaran tidak terawasi (*unsupervised learning*) yang terbukti efektif dalam membentuk representasi data untuk tujuan deteksi anomali (Ruff dkk., 2019). VAE mempelajari distribusi laten data sehingga mampu mengidentifikasi deviasi signifikan dari distribusi tersebut (Wang dkk., 2022; Zimmerer dkk., 2019). Fleksibilitas VAE juga telah dibuktikan melalui penerapannya pada berbagai jenis data, termasuk yang memiliki karakteristik kompleks (Neloy dan Turgeon, 2024).

Meskipun penerapan VAE dalam berbagai penelitian pembelajaran tidak terawasi telah cukup berkembang, pemanfaatannya secara khusus untuk analisis sinyal vibrasi masih terbilang terbatas. Padahal, sinyal vibrasi memiliki potensi besar sebagai indikator kesehatan mesin, dan dengan memadukan VAE yang andal dalam mendeteksi anomali, solusi pemantauan kondisi mesin yang lebih efektif dapat diwujudkan.

## 1.2 Rumusan Masalah

VAE telah banyak digunakan dalam berbagai domain untuk deteksi anomali, seperti pada data citra dan teks. Namun, penggunaannya pada sinyal vibrasi masih belum banyak dieksplorasi. Sebagian besar metode tradisional, seperti *Principal Component Analysis* (PCA) atau model berbasis statistik, cenderung memiliki keterbatasan dalam menangkap pola yang kompleks dan tidak linier pada sinyal vibrasi. Hal ini menyebabkan performa deteksi anomali kurang optimal. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan berbasis VAE yang dapat meningkatkan akurasi dalam mengenali pola anomali, menentukan kombinasi hiperparameter yang optimal, serta mengevaluasi kinerja model secara menyeluruh dalam mendeteksi anomali pada sinyal vibrasi.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan model deteksi anomali pada sinyal vibrasi menggunakan VAE untuk meningkatkan akurasi dalam mengenali pola anomali.
2. Menentukan kombinasi hiperparameter terbaik untuk model VAE guna memaksimalkan performa deteksi anomali.
3. Mengevaluasi performa model VAE dalam mendeteksi anomali pada sinyal vibrasi.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menambah wawasan dalam pengembangan model deteksi anomali berbasis VAE pada domain sinyal vibrasi.
2. Membantu meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam proses deteksi anomali pada sistem monitoring mesin.
3. Memberikan rekomendasi kombinasi hiperparameter yang optimal untuk model VAE dalam aplikasi deteksi anomali pada sinyal vibrasi.

#### **1.5 Batasan Masalah**

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. *Dataset* yang digunakan merupakan sinyal vibrasi yang telah dikonversi ke domain frekuensi. Dengan demikian, proses pengolahan data dari domain waktu ke domain frekuensi tidak menjadi ruang lingkup penelitian ini.
2. Penelitian ini tidak membahas mengenai aspek fisik sensor, seperti jenis sensor, lokasi pemasangan, atau kualitas sinyal. Data yang digunakan diasumsikan sudah tersedia dalam kondisi siap untuk dianalisis.

#### **1.6 Sistematika Penulisan**

Penelitian ini ditulis dengan sistematika sebagai berikut:

##### **Bab I Pendahuluan**

Menyajikan latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

##### **Bab 2 Tinjauan Pustaka**

Menguraikan teori-teori yang relevan, penelitian terdahulu, serta konsep-konsep dasar yang mendasari penelitian ini.

##### **Bab 3 Metode Penelitian**

Menjelaskan desain penelitian, metodologi yang digunakan, serta teknik analisis data yang diterapkan.

**Bab 4 Hasil dan Analisa**

Menyajikan hasil penelitian yang diperoleh dan analisis terhadap data yang telah dikumpulkan.

**Bab 5 Kesimpulan**

Menyimpulkan hasil penelitian, memberikan rekomendasi, serta mengemukakan saran untuk penelitian selanjutnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Almansoori, M., & Telek, M. (2023). Anomaly Detection using combination of Autoencoder and Isolation Forest. *1st Workshop on Intelligent Infocommunication Networks, Systems and Services*, 25–30
- Baur, C., Wiestler, B., Albarqouni, S., & Navab, N. (2019). Deep Autoencoding Models for Unsupervised Anomaly Segmentation in Brain MR Images (pp. 161–169)
- Bhuiyan, M. R., & Uddin, J. (2023). Deep Transfer Learning Models for Industrial Fault Diagnosis Using Vibration and Acoustic Sensors Data: A Review. *Vibration*, 6(1), 218–238
- Do, J. S., Kareem, A. B., & Hur, J.-W. (2023). LSTM-Autoencoder for Vibration Anomaly Detection in Vertical Carousel Storage and Retrieval System (VCSRS). *Sensors*, 23(2), 1009
- Esmaeili, F., Cassie, E., Nguyen, H. P. T., Plank, N. O. V., Unsworth, C. P., & Wang, A. (2023). Anomaly Detection for Sensor Signals Utilizing Deep Learning Autoencoder-Based Neural Networks. *Bioengineering*, 10(4), 405
- Finke, T., Krämer, M., Morandini, A., Mück, A., & Oleksiyuk, I. (2021). Autoencoders for unsupervised anomaly detection in high energy physics. *Journal of High Energy Physics*, 2021(6), 161
- Fraser, K., Homiller, S., Mishra, R. K., Ostdiek, B., & Schwartz, M. D. (2022). Challenges for unsupervised anomaly detection in particle physics. *Journal of High Energy Physics*, 2022(3), 66

- Goyal, D., & Pabla, B. S. (2016). The Vibration Monitoring Methods and Signal Processing Techniques for Structural Health Monitoring: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23(4), 585–594
- Hadi, R. H., Hady, H. N., Hasan, A. M., Al-Jodah, A., & Humaidi, A. J. (2023). Improved Fault Classification for Predictive Maintenance in Industrial IoT Based on AutoML: A Case Study of Ball-Bearing Faults. *Processes*, 11(5), 1507
- Hong, L., Zhang, Y., Li, L., Zhang, P., & Liu, J. (2023). Low-frequency FBG vibration sensors for micro-seismic monitoring. *Measurement Science and Technology*, 34(10), 105120
- Jawahar, P., Aarrestad, T., Chernyavskaya, N., Pierini, M., Wozniak, K. A., Ngadiuba, J., Duarte, J., & Tsan, S. (2022a). Improving Variational Autoencoders for New Physics Detection at the LHC With Normalizing Flows. *Frontiers in Big Data*, 5
- Jawahar, P., Aarrestad, T., Chernyavskaya, N., Pierini, M., Wozniak, K. A., Ngadiuba, J., Duarte, J., & Tsan, S. (2022b). Improving Variational Autoencoders for New Physics Detection at the LHC With Normalizing Flows. *Frontiers in Big Data*, 5
- Kingma, D. P., & Welling, M. (2013). *Auto-Encoding Variational Bayes*.
- Li, C., Guo, H., Gong, Yihui, & Yuan, Zhaoting. (2023). Design of equipment health monitoring system based on digital twin. In W. Xiao & L. Leng (Eds.), *Second International Conference on Electronic Information Technology (EIT 2023)* (p. 7). SPIE
- Li, G., & Jung, J. J. (2023). Deep learning for anomaly detection in multivariate time series: Approaches, applications, and challenges. *Information Fusion*, 91, 93–102
- Li, P., Pei, Y., & Li, J. (2023). A comprehensive survey on design and application of autoencoder in deep learning. *Applied Soft Computing*, 138, 110176
- Lu, Y., & Xu, P. (2018). Anomaly Detection for Skin Disease Images Using Variational Autoencoder.

- Ma, B., Zhao, Y., & Jiang, Z. (2018). Application of Variational Auto-Encoder in Mechanical Fault Early Warning. *2018 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chongqing)*, 1263–1268
- Masaki, A., Nagumo, K., Lamsal, B., Oiwa, K., & Nozawa, A. (2021). Anomaly detection in facial skin temperature using variational autoencoder. *Artificial Life and Robotics*, 26(1), 122–128
- Mehamud, I., Marklund, P., Björling, M., & Shi, Y. (2022). Machine condition monitoring enabled by broad range vibration frequency detecting triboelectric nano-generator (TENG)-based vibration sensors. *Nano Energy*, 98, 107292
- Mohd Ghazali, M. H., & Rahiman, W. (2021). Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review. *Shock and Vibration*, 2021(1)
- Neloy, A. A., & Turgeon, M. (2024). A comprehensive study of auto-encoders for anomaly detection: Efficiency and trade-offs. *Machine Learning with Applications*, 17, 100572
- Nicholaus, I. T., Park, J. R., Jung, K., Lee, J. S., & Kang, D.-K. (2021). Anomaly Detection of Water Level Using Deep Autoencoder. *Sensors*, 21(19), 6679
- Niu, Z., Yu, K., & Wu, X. (2020). LSTM-Based VAE-GAN for Time-Series Anomaly Detection. *Sensors*, 20(13), 3738
- Ogawa, N., & Kawahara, R. (2024). Method for Network-Anomaly Detection and Failure-Scale Estimation. *IEICE Communications Express*, 13(6), 206–209
- Park, M.-H., Chakraborty, S., Vuong, Q. D., Noh, D.-H., Lee, J.-W., Lee, J.-U., Choi, J.-H., & Lee, W.-J. (2022). Anomaly Detection Based on Time Series Data of Hydraulic Accumulator. *Sensors*, 22(23), 9428
- Ruff, L., Vandermeulen, R. A., Görnitz, N., Binder, A., Müller, E., Müller, K.-R., & Kloft, M. (2019). *Deep Semi-Supervised Anomaly Detection*.
- V Baviskar, P., & Nayak, C. (2024). Equipment Health Monitoring Using Machine Learning Techniques. *International Research Journal of Multidisciplinary Scope*, 05(03), 798–808



- Velandia-Cardenas, C., Vidal, Y., & Pozo, F. (2024). Wind Turbine Gearbox Condition Monitoring Using Vibration Data and Mel-Frequency Cepstral Coefficients. *Latin American Workshop on Structural Health Monitoring*
- Wang, L., Tan, H., Zhou, F., Zuo, W., & Sun, P. (2022). Unsupervised Anomaly Video Detection via a Double-Flow ConvLSTM Variational Autoencoder. *IEEE Access*, *10*, 44278–44289
- Zhong, D., Xia, Z., Zhu, Y., & Duan, J. (2023). Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. *Heliyon*, *9*(4), e14534
- Zimmerer, D., Isensee, F., Petersen, J., Kohl, S., & Maier-Hein, K. (2019). *Unsupervised Anomaly Localization Using Variational Auto-Encoders* (pp. 289–297)
- Zonta, T., da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, *150*, 106889