



OPTIMASI MODEL *HYBRID CONVOLUTIONAL VISION* *TRANSFORMER* UNTUK DEFECT DETECTION PADA *EXTRUSION-BASED 3D FOOD PRINTING*

CHOLID MAWARDI



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN
BOGOR
2025**



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Optimasi Model *Hybrid Convolutional Vision Transformer* untuk *Defect Detection* pada *Extrusion-Based 3D Food Printing*” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

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

Bogor, Agustus 2025

Cholid Mawardi
G6601221004



RINGKASAN

CHOLID MAWARDI. Optimasi Model *Hybrid Convolutional Vision Transformer* untuk *Defect Detection* pada *Extrusion-Based 3D Food Printing*. Dibimbing oleh AGUS BUONO, KARLISA PRIANDANA dan HERIANTO.

Teknologi 3D *Printing* khususnya cetak objek makanan di Indonesia belum banyak diterapkan baik sisi industri maupun masyarakat umum. Efisiensi dan efektivitas cetak makanan pada 3D *Food Printing* sangatlah diperlukan demi menghemat bahan material cetak makanan. Sistem *monitoring* cetak jarak jauh diperlukan untuk membantu pengguna dalam mengawasi proses cetak tersebut. Selain dapat menghemat bahan material, sistem *monitoring* jarak jauh secara *real-time* bagi proses cetak 3D *Food Printing* juga dapat melakukan pengawasan proses cetak tanpa harus menunggu di tempat secara efektif. Beberapa riset sebelumnya telah dilakukan penelitian dalam hal deteksi *defect* pada objek cetak pada mesin 3D *Printing* konvensional. Penelitian tersebut dilakukan dengan dua model algoritma yakni dengan model *machine learning* (ML) dan *deep learning* (DL) dengan nilai akurasi bervariasi yang didasari bahan material yang digunakan. *Convolutional Neural Network* (CNN) menjadi salah satu metode *deep learning* yang paling banyak digunakan pada jenis klasifikasi dan *object detection* untuk *monitoring defect* pada 3D *Printing* konvensional. Hal ini menjadi peluang penelitian dimana model *deep learning* yang digunakan untuk melakukan deteksi *defect* pada objek 3D *Food Printing* belum pernah dilakukan. Tantangan algoritma *deep learning* pada implementasinya perlu beban komputasi tinggi dan kumpulan data yang besar. Tantangan lain adalah kompleksitas data berupa objek cetak makanan dengan tingkat kesulitan dalam orientasi dan skala yang bervariasi.

Penelitian awal dilakukan mendeteksi *defect* pada makanan yang sedang dicetak secara *real-time* berbasis *Internet of Things* (IoT). Skema *setup formation* berbasis IoT diterapkan sebagai kombinasi alat sebagai proses cetak awal. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji sistem deteksi yang biasa digunakan pada 3D *Printing* biasa agar diterapkan pada 3D *Food Printing*. Hasil dari penelitian ini memberikan informasi bahwa deteksi cacat dan kegagalan proses cetak dapat dikontrol secara jarak jauh (PC dan *Smartphone*). Serta *monitoring* yang sebelumnya hanya diterapkan pada 3D *Printing* biasa, dapat diterapkan pada *monitoring 3D Food Printing* dengan deteksi *defect* pada proses cetak. Selain itu, penelitian ini bertujuan mendapatkan kumpulan dataset citra *defect* untuk dapat diklasifikasikan dengan model *deep learning*. Penelitian selanjutnya melakukan klasifikasi awal pada model *pre-trained learning* dengan model ResNet-50 dan Inception-V3 berdasarkan dataset hasil deteksi *real-time 3D Food Printing* ditambah dengan dataset 3D *Printing* konvensional. Penelitian utama mengusulkan model Con4ViT, model *hybrid* yang menggabungkan model *vision transformer* (ViT) dengan kemampuan ekstraksi fitur milik *Convolutional Neural Network* (CNN). Fitur yang diekstraksi secara lokal di CNN digabungkan menggunakan fitur global dengan empat blok *encoder transformer*. Kebaruan penelitian ini adalah membangun serta melakukan metode *hybrid* antara CNN dengan mengekstrak fitur tingkat lokal ke dalam fitur ekstraksi global milik ViT dengan memodifikasi beberapa fitur dalam *encoder* serta urutan arsitektur *hybrid* antara CNN dengan ViT.

Penggunaan konvolusi satu dimensi pada *feed forward network* (FFN) dilakukan pada penelitian ini. Kemudian modikasi urutan *dataflow* proses *hybrid* dengan empat blok *encoder* transformer menggunakan tiga skenario yang akan diimplementasikan pada model *hybrid* Con4ViT. Tiga skenario berupa *reshape linear projection* (RLP), *reshape embedding linear projection* (RELP) dan *reshape embedding linear projection* (RELP) *patches* disimulasikan untuk mendapatkan kinerja terbaik. Hasil simulasi jika dibandingkan antara model Con4ViT dengan skenario RLP, RELP dan RELP *patches* dihasilkan kinerja terbaik pada model Con4ViT RLP dengan akurasi 95,91% dan 939,06 MFLOPs. Simulasi selanjutnya dilakukan perbandingan dengan model *deep learning* berbasis *pre-trained learning* lainnya seperti VGG16, VGG19, EfficientNetB2, Inception-V3, dan ResNet50. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model tersebut menghasilkan akurasi sebesar 95,91%, lebih tinggi dibandingkan teknik *pre-trained learning* lain, yaitu VGG16, VGG19, MobileNetV2, EfficientNetB2, InceptionV3, dan ResNet50, dengan akurasi masing-masing sebesar 77,88%, 86,30%, 82,95%, 90,87%, 84,62%, dan 93,83%. Penelitian ini menunjukkan bahwa model Con4ViT yang diusulkan dapat digunakan untuk klasifikasi *defect* 3D *Food Printing* dengan akurasi yang tinggi dan beban komputasi yang ringan. Penggantian lapisan akhir *fully connected* pada FFN dengan lapisan konvolusi satu dimensi (*Conv1D*) terbukti dapat meningkatkan efisiensi parameter sehingga memiliki hasil kinerja yang baik. Lapisan konvolusi tersebut juga lebih efektif dalam menangkap pola lokal dan dependensi antar fitur sehingga beban komputasi menjadi lebih ringan. Selain itu, penggunaan parameter yang lebih sedikit memungkinkan model ini untuk diimplementasikan secara efisien pada perangkat IoT dan *smartphone*, namun tetap memiliki nilai akurasi yang tinggi.

Setelah proses pemodelan, dilanjutkan pembuatan *framework* web 3D *Food Printing* berupa *prototype* yang dikembangkan pada *server* colab berbasis flask. *Framework* web tersebut diberi nama Cakari 3D *Food Printing*. Sistem kerja web ini berbasis *tunnel* yang dilakukan pada *localhost* milik flask sehingga bisa diakses dari internet. Tujuan dari penggunaan *framework* web ini memungkinkan model dapat diakses oleh aplikasi lain sehingga dapat diintergrasikan sesuai kebutuhan seperti aplikasi berbasis *smartphone*, IoT ataupun *cloud*.

Kata Kunci: *Convolutional Neural Network, Defect Detection, Vision Transformer, 3D Food Printing*



SUMMARY

CHOLID MAWARDI. Hybrid Convolutional Vision Transformer Model Optimization for Defect Detection in Extrusion-Based 3D Food Printing. Supervised by AGUS BUONO, KARLISA PRIANDANA, and HERIANTO.

3D printing technology, especially printing food objects in Indonesia, has not been widely applied by either the industry or the general public. The efficiency and effectiveness of 3D Food Printing are needed to save food printing materials. A remote print monitoring system is needed to assist users in monitoring the print process. In addition to saving materials, a real-time remote monitoring system for the 3D food printing process can also effectively monitor the printing process without having to wait on-site. Some previous research has been conducted in terms of defect detection on printed objects on conventional 3D printing machines. The research was conducted with two algorithm models, namely machine learning (ML) and deep learning (DL) models, with varying accuracy values based on the materials used. Convolutional Neural Network (CNN) is one of the most widely used deep learning methods in classification and object detection for monitoring defects in conventional 3D printing. This is a research opportunity where a deep learning model is used to perform defect detection on 3D Food Printing objects, which has never been done. The challenge of deep learning algorithms in their implementation requires high computational load and large data sets. Another challenge is the complexity of data in the form of food printing objects with varying levels of difficulty in orientation and scale.

Initial research was conducted to detect defects in food being printed in real-time based on the Internet of Things (IoT). The IoT-based setup formation scheme is applied as a combination of tools for the initial printing process. The purpose of this research is to test the detection system commonly used in ordinary 3D printing to be applied to 3D food printing. The results of this research provide information that defect detection and failure of the printing process can be controlled remotely (PC and Smartphone). As well as monitoring that was previously only applied to ordinary 3D Printing, it can be applied to 3D Food Printing monitoring with defect detection in the printing process. In addition, this research aims to obtain a collection of defect image datasets to be classified with deep learning models. The next research performs initial classification on pre-trained learning models with ResNet-50 and Inception-V3 models based on real-time detection datasets of 3D Food Printing, coupled with conventional 3D Printing datasets. The main research proposes the Con4ViT model, a hybrid model that combines the vision transformer (ViT) model with the feature extraction capabilities of a Convolutional Neural Network (CNN). Locally extracted features in the CNN are combined using global features with four transformer encoder blocks. The novelty of this study is: building and implementing a hybrid method between CNN by extracting local-level features into ViT's global extraction features by modifying several features in the encoder and the sequence of hybrid architectures between CNN and ViT.

The use of one-dimensional convolution in a feed-forward network (FFN) was carried out in this study. Then, modify the dataflow sequence of the hybrid process with four block encoder transformers using three scenarios that will be implemented in the Con4ViT hybrid model. The three scenarios of reshape linear

@Hak Cipta Universitas IPB

IPB University

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

projection (RLP), reshape embedding linear projection (RELP), and reshape embedding linear projection (RELP) patches are simulated to get the best performance. The simulation results, when compared between the Con4ViT model with the RLP, RELP, and RELP patches scenarios, resulted in the best performance on the Con4ViT RLP model with 95.91% accuracy and 939.06 MFLOPs. Further simulations were carried out in comparison with other pre-trained deep learning models such as VGG16, VGG19, EfficientNetB2, InceptionV3, and ResNet50. The simulation results show that the model produces an accuracy of 95.91%, higher than other pre-trained learning techniques, namely VGG16, VGG19, MobileNetV2, EfficientNetB2, InceptionV3, and ResNet50, with accuracies of 77.88%, 86.30%, 82.95%, 90.87%, 84.62%, and 93.83%, respectively. This study shows that the proposed Con4ViT model can be used for 3D Food Printing defect classification with high accuracy and light computational load. Replacing the final fully connected layer in the FFN with a one-dimensional convolutional layer (Conv1D) has been shown to improve parameter efficiency, resulting in improved performance. This convolutional layer is also more effective at capturing local patterns and dependencies between features, reducing the computational burden. Furthermore, the use of fewer parameters allows this model to be implemented efficiently on IoT devices and smartphones while maintaining high accuracy.

After the modeling process, creating a 3D Food Printing web framework in the form of a prototype was continued, which was developed on a Flask-based colab server. The web framework is named Cakari 3D Food Printing. The working system of this web is based on a tunnel that is carried out on the Flask localhost so that it can be accessed from the internet. The purpose of using this web framework is to allow the model to be accessed by other applications so that it can be integrated according to needs, such as smartphones, IoT, or cloud-based applications.

Keywords: Convolutional Neural Network, Defect Detection, Vision Transformer, 3D Food Printing



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

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

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

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

OPTIMASI MODEL *HYBRID CONVOLUTIONAL VISION TRANSFORMER* UNTUK *DEFECT DETECTION* PADA *EXTRUSION-BASED 3D FOOD PRINTING*

CHOLID MAWARDI

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Ilmu Komputer

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN
BOGOR
2025**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Dr. Toto Haryanto., S.Kom., M.Si
- 2 Dwi Riyono., S.T., M.Ak., Ph.D

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. Toto Haryanto., S.Kom., M.Si
- 2 Dwi Riyono., S.T., M.Ak., Ph.D

Judul Disertasi : Optimasi Model *Hybrid Convolutional Vision Transformer* untuk *Defect Detection* pada *Extrusion-Based 3D Food Printing*

Nama : Cholid Mawardi
NIM : G6601221004

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si, M.Kom



Pembimbing 2:
Dr. Karlisa Priandana, S.T, M.Eng



Pembimbing 3:
Prof. Dr. Eng. Ir. Herianto, S.T, M.Eng, IPU,
ASEAN Eng



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si., M.Kom
NIP 197501301998022001



Dekan Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika:
Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si, M.Kom
NIP 196607021993021001



Tanggal Ujian: 25 Juni 2025

Tanggal Lulus:

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak tahun 2023 sampai tahun 2025 ini adalah Optimasi Model *Hybrid Convolutional Vision Transformer* untuk *Defect Detection* pada *Extrusion-Based 3D Food Printing*.

Terima kasih penulis ucapkan kepada komisi pembimbing, Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si., M.Kom. selaku ketua komisi pembimbing, Dr. Karlisa Priandana, S.T., M.Eng. selaku anggota komisi pembimbing dan Prof. Dr. Eng. Ir. Herianto, S.T., M.Eng, IPU, ASEAN Eng. selaku anggota komisi pembimbing, yang telah banyak memberikan arahan dan bimbingannya kepada penulis dengan penuh kesabaran. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada:

1. Dekan Sekolah Sains Data, Matematika dan Informatika, Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si., M.Kom.
2. Dr. Toto Haryanto., S.Kom., M.Si. selaku penguji 1 luar komisi ujian tertutup dan ujian terbuka.
3. Dwi Riyono., S.T. M.Ak. Ph.D. selaku penguji 2 luar komisi ujian tertutup dan ujian terbuka.
4. Prof. Endang Warsiki, S.TP., M.Si. selaku moderator pada seminar hasil.
5. Ketua Program Studi S3 Ilmu Komputer SSMI IPB, Prof. Dr. Imas S. Sitanggang, M.Kom dan Sekretaris Program Studi S3 Ilmu Komputer, Dr. Hendra Rahmawan, M.T. beserta segenap dosen yang telah banyak memberikan ilmu dan pencerahan serta arahan selama masa perkuliahan.
6. Tenaga Kependidikan Program Studi S3 Ilmu Komputer FMIPA IPB yang telah banyak membantu penulis dalam masalah administrasi dan informasi.
7. Direktur Politeknik Negeri Media Kreatif, Dr. Tipri Rose Kartika, M.M. yang telah memberikan izin belajar serta bantuan pendanaan pendidikan kepada penulis untuk studi lanjut S3.
8. Istri penulis, Hani Rahmawati dan anak-anak penulis, Emir Adnan, Ariq Zaidan dan Khaizan Dafi yang penuh pengorbanan dan kesabaran serta doa dan kasih sayang dalam membersamai penulis. Kepada Ibunda Hj. Cucum Sumiyati, Kakak Ipar Mamay Andraini, Adi Khairul Anwar serta Kakak Dian Rufaedah yang telah memberi dukungan dan doa untuk penulis.
9. Teman-teman angkatan 5 tahun 2022 S3 Program Studi Ilmu Komputer SSMI IPB yang telah bersama-sama berjuang menimba ilmu dan saling memotivasi selama studi.
10. Pihak lainnya yang tidak penulis sebutkan namun turut mendukung dalam penyelesaian penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa disertasi ini tentunya masih memiliki keterbatasan dan kekurangan. Namun, penulis berharap disertasi dapat bermanfaat bagi pihak-pihak yang memerlukan dan bagi pengembangan ilmu pengetahuan. Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Agustus 2025

Cholid Mawardi

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xi
DAFTAR ISTILAH	xii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan	6
1.4 Manfaat	6
1.5 Ruang Lingkup	6
1.6 Kebaruan (<i>novelty</i>)	7
1.7 Sistematika Penulisan	7
II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Perkembangan 3D <i>Printing</i>	8
2.2 Inovasi 3D <i>Food Printing</i>	8
2.3 Kegagalan Cetak 3D <i>Food Printing</i>	10
2.4 <i>Defect Detection</i>	11
2.5 Material 3D <i>Food Printing</i>	13
2.6 Klasifikasi Citra Objek <i>Defect</i>	13
2.7 Convolutional Neural Network (CNN)	14
2.8 Vision Transformer	18
2.9 Hybrid CNN-ViT	22
III METODE	24
3.1 Tahapan dan Waktu Penelitian	24
3.2 Data Penelitian	28
IV DETEKSI <i>REAL-TIME DEFECT</i> 3D <i>FOOD PRINTING</i>	30
4.1 Deteksi <i>Defect</i> 3D <i>Food Printing</i>	30
4.2 <i>Setup Formation</i>	30
4.3 Proses Pencetakan	33
4.4 Hasil dan Pembahasan	37
4.5 Simpulan	39
V KLASIFIKASI <i>DEFECT</i> DENGAN <i>PRE-TRAINED LEARNING</i>	41
5.1 Pendahuluan	41
5.2 Metode	42
5.3 Arsitektur Model	44
5.4 Hasil dan Pembahasan	48
5.5 Simpulan	52
VI MODEL <i>HYBRID CONVOLUTIONAL VISION TRANSFORMER</i>	53
6.1 Pendahuluan	53
6.2 Pengembangan Con4ViT	53
6.3 Arsitektur Con4ViT	55

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

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



6.4	Hasil dan Pembahasan	65
6.5	Analisis GRAD-CAM	70
6.6	Perbandingan Con4ViT RLP dengan model <i>pre-training</i>	72
6.7	Implementasi Model	74
6.8	Simpulan	75
VII SIMPULAN DAN SARAN		76
7.1	Simpulan	76
7.2	Saran	76
DAFTAR PUSTAKA		78
LAMPIRAN		86
RIWAYAT HIDUP		89

DAFTAR TABEL

1	<i>State-of-the-art</i> terkait penelitian <i>defect detection 3D printing/additive manufacturing</i>	3
2	<i>State of the Art</i> terkait penelitian <i>Hybrid CNN-ViT</i>	4
3	Perbedaan mesin <i>3D Printing & 3D Food Printing</i>	10
4	Kegagalan cetak <i>3D Food Printing</i>	11
5	Jenis <i>defect detection</i> pada <i>3D Food Printing</i>	12
6	Kelebihan menggunakan material coklat	13
7	Variabel dataset	29
8	Spesifikasi <i>food extruder</i>	31
9	Komponen perbandingan material coklat	35
10	Uji parameter proses cetak	35
11	Perbandingan monitoring	39
12	Arsitektur ResNet-50	45
13	Arsitektur Inception-V3	46
14	Perbandingan <i>learning rate</i> model Inception-V3	48
15	Perbandingan <i>learning rate</i> model ResNet-50	48
16	Perbandingan kinerja	51
17	Perbandingan penelitian dengan <i>3D Printing</i>	51
18	Nilai dan parameter teknik augmentasi yang diterapkan	55
19	Arsitektur RLP	59
20	Arsitektur RELP	61
21	Arsitektur RELP <i>Patches</i>	63
22	Perbandingan tiga skenario modifikasi Con4ViT	70
23	Perbandingan model Con4ViT dengan model <i>pre-trained CNN</i>	73

DAFTAR GAMBAR

1	<i>Defect</i> pada objek cetak <i>3D Printing</i>	2
2	Tren penelitian <i>3D Food Printing</i>	3
3	Sistematika penulisan	7
4	Alur cetak <i>3D Food Printing</i>	9
5	Dataset klasifikasi objek <i>defect</i> 5 kelas	14
6	Dataset weld X-Ray 2	14
7	<i>Max pooling</i> dan <i>average pooling</i>	17
8	<i>Transfer learning</i> pada <i>pre-trained learning CNN</i>	18
9	Model pengembangan transformer pada citra	19
10	Ubah citra menjadi <i>patch</i>	20
11	<i>Hybrid method CNN-Vision Transformer</i>	22
12	Kombinasi CNN-ViT menggunakan model <i>pre-trained learning</i>	23
13	Tahapan penelitian	24
14	Tahapan deteksi <i>real-time</i>	25
15	Konvolusi dengan model <i>pre-trained CNN</i>	26
16	Kombinasi CNN-vision transformer	26
17	Dataset coklat	28

18	Hasil <i>setup formation</i>	31
19	Alur kerja monitoring 3D <i>Food Printing</i>	32
20	Desain 3D model <i>geometric figure</i>	33
21	G-code desain <i>geometric figure</i>	34
22	Pola G-code	35
23	Monitoring cetak dengan octoprint	37
24	Hasil cetak 3D <i>Food Printing</i>	37
25	Monitoring menggunakan octoprint	38
26	Pemantauan melalui smartphone Infinix Hot 10	38
27	<i>Flowchart</i> penelitian	42
28	Dataset <i>defect</i> dan <i>no defect</i>	43
29	Model <i>residual block</i>	44
30	Bagian modul inception-V3	45
31	Hasil model Inception-V3 pada 3D <i>Food Printing</i>	47
32	<i>Training</i> dan <i>validation accuracy</i> pada Inception-V3	49
33	<i>Training</i> dan <i>validation loss</i> pada Inception-V3	49
34	<i>Training</i> dan <i>validation accuracy</i> pada ResNet-50	50
35	<i>Training</i> dan <i>validation loss</i> pada ResNet-50	50
36	Tahapan penelitian	54
37	Model Con4ViT	56
38	<i>Patch</i> pada image 3D <i>Food Printing</i>	57
39	Skenario model <i>encoder</i>	58
40	<i>Reshape linear projection</i>	58
41	<i>Reshape embedding linear projection</i> (RELP)	60
42	RELP <i>Patches</i>	62
43	Nilai ROC-AUC Sempurna	65
44	Kombinasi dataset 3D <i>Food Printing</i> dan 3D <i>Printing</i>	65
45	Hasil praproses data 3D <i>Food Printing</i>	66
46	<i>Training</i> skenario 1-RLP	66
47	<i>Training</i> skenario 2-RELP	67
48	<i>Training</i> skenario 3-RELP <i>Patches</i>	67
49	Hasil <i>confusion matrix</i>	68
50	Kurva ROC RLP	68
51	Kurva ROC RELP	69
52	Kurva ROC RELP <i>Patches</i>	69
53	Analisis Grad-CAM pada citra 3D <i>Food Printing</i>	70
54	Perbandingan Grad-CAM CNN <i>Sequential</i> dengan CNN <i>pre-trained</i>	72
55	Performa model Con4ViT dengan model lain pada <i>training</i> dan validasi	73
56	Cakari <i>Prediction</i> dengan citra 3D <i>Food Printing</i>	74
57	Cakari <i>Prediction</i> dengan citra 3D <i>Printing</i>	74



DAFTAR LAMPIRAN

1	Parameter cetak keseluruhan pada proses <i>slicing</i> desain <i>geometric figur</i>	87
2	Kode awal perintah instruksi G-Code desain <i>geometric figure</i>	88