

**OPTIMASI PEMILIHAN DESAIN MODEL 3D OBJEK KA'BAH MENGGUNAKAN
METODE TOPSIS DAN PSO BERDASARKAN
DATA SIMULASI PENCETAKAN**

SKRIPSI

Oleh:
MUHAMAD MAULANA AKBAR
NIM. 220605110091



**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

**OPTIMASI PEMILIHAN DESAIN MODEL 3D OBJEK KA'BAH MENGGUNAKAN
METODE TOPSIS DAN PSO BERDASARKAN
DATA SIMULASI PENCETAKAN**

SKRIPSI

Diajukan kepada:
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Komputer (S.Kom)

Oleh:
MUHAMAD MAULANA AKBAR
NIM. 220605110091

**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

HALAMAN PERSETUJUAN

**OPTIMASI PEMILIHAN DESAIN MODEL 3D OBJEK KA'BAH MENGGUNAKAN
METODE TOPSIS DAN PSO BERDASARKAN
DATA SIMULASI PENCETAKAN**

SKRIPSI

Oleh:

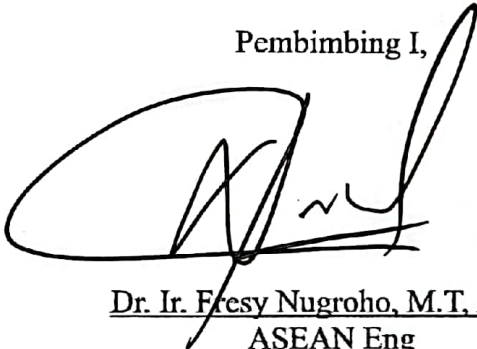
MUHAMAD MAULANA AKBAR

NIM. 220605110091

Telah Diperiksa dan Disetujui Untuk Diuji:

Tanggal: 19 Mei 2026

Pembimbing I,



Dr. Ir. Fesy Nugroho, M.T, IPM.,

ASEAN Eng

NIP. 19710722 201101 1 001

Pembimbing II,



Hani Nurhayati, M.T

NIP. 19780625 200801 2 006

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Informatika

Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang



Supriyono, M. Kom

NIP. 19841010 201903 1 012

HALAMAN PENGESAHAN

OPTIMASI PEMILIHAN DESAIN MODEL 3D OBJEK KA'BAH MENGGUNAKAN METODE TOPSIS DAN PSO BERDASARKAN DATA SIMULASI PENCETAKAN

SKRIPSI

Oleh :
MUHAMAD MAULANA AKBAR
NIM. 220605110091

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi
dan Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Komputer (S.Kom)
Tanggal: 20 Mei 2026

Susunan Dewan Penguji

Ketua Penguji	: <u>Prof. Dr. Ir. Muhammad Faisal, M.T</u> NIP. 19740510 200501 1 007
Anggota Penguji I	: <u>Supriyono, M. Kom</u> NIP. 19841010 201903 1 012
Anggota Penguji II	: <u>Dr. Ir. Fresy Nugroho, M.T, IPM.,</u> <u>ASEAN Eng</u> NIP. 19710722 201101 1 001
Anggota Penguji III	: <u>Hani Nurhayati, M.T</u> NIP. 19780625 200801 2 006



Mengetahui dan Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Informatika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang



Supriyono, M. Kom
NIP. 19841010 201903 1 012

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhamad Maulana Akbar
NIM : 220605110091
Fakultas / Program Studi : Sains dan Teknologi / Teknik Informatika
Judul Skripsi : Optimasi Pemilihan Desain Model 3D Objek
Ka'bah Menggunakan Metode TOPSIS dan PSO
Berdasarkan Data Simulasi Pencetakan

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa Skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan data, tulisan, atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai hasil tulisan atau pikiran saya sendiri, kecuali dengan mencantumkan sumber cuplikan pada daftar pustaka.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan skripsi ini merupakan hasil jiplakan, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang,
Yang membuat pernyataan,



Muhamad Maulana Akbar
NIM. 220605110091

MOTTO

*“Life is like riding a bicycle.
To keep your balance, you must keep moving.”*

— Albert Einstein

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillah rabbil 'alamin, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah ﷻ atas segala rahmat, karunia, pertolongan, serta kemudahan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Setiap proses yang dilalui dalam penyusunan skripsi ini tentu tidak terlepas dari izin dan kehendak-Nya. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad ﷺ, suri teladan bagi seluruh umat manusia yang telah membawa umatnya dari zaman kegelapan menuju zaman yang penuh dengan ilmu pengetahuan dan kebenaran.

Dengan penuh rasa syukur dan kerendahan hati, karya ini penulis persembahkan kepada Papa dan Mama tercinta yang selalu menjadi sumber kekuatan, doa, dan semangat dalam setiap langkah kehidupan penulis. Terima kasih atas kasih sayang, perhatian, dukungan, serta pengorbanan yang tidak ternilai. Doa yang senantiasa dipanjatkan, nasihat yang diberikan, serta kepercayaan yang selalu ditanamkan menjadi bagian penting yang menguatkan penulis dalam menjalani proses pendidikan hingga sampai pada tahap penyusunan skripsi ini.

Penulis juga mempersembahkan karya ini kepada Kakak dan seluruh keluarga besar yang senantiasa memberikan doa, dukungan, serta motivasi. Kehangatan, perhatian, dan dorongan dari keluarga menjadi salah satu kekuatan yang membantu penulis untuk tetap bertahan dan menyelesaikan skripsi ini dengan baik.

Ucapan terima kasih dan persembahan ini juga penulis sampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, kritik, dan saran selama proses penyusunan skripsi ini. Kesabaran, ilmu, serta waktu yang telah

diberikan menjadi bagian yang sangat berarti bagi penulis dalam menyelesaikan penelitian ini. Setiap masukan yang diberikan telah membantu penulis untuk memahami proses penelitian dengan lebih baik, memperbaiki kekurangan, serta menyusun skripsi ini secara lebih terarah.

Tidak lupa, penulis mempersembahkan karya ini kepada teman-teman seperjuangan yang telah membersamai perjalanan akademik ini. Terima kasih atas kebersamaan, bantuan, dukungan, dan semangat yang diberikan selama masa perkuliahan hingga proses penyusunan skripsi. Kehadiran teman-teman menjadi bagian berharga dalam perjalanan ini, baik dalam berbagi cerita, saling menguatkan, maupun menghadapi berbagai tantangan bersama.

Terakhir, karya ini penulis persembahkan kepada diri sendiri sebagai bentuk penghargaan atas usaha, kesabaran, keteguhan, dan komitmen dalam menyelesaikan setiap proses yang telah dilalui. Terima kasih telah berusaha untuk tetap bertahan, terus belajar, dan tidak menyerah meskipun perjalanan ini tidak selalu mudah. Semoga pencapaian ini menjadi pengingat bahwa setiap usaha yang dilakukan dengan sungguh-sungguh akan membawa hasil yang baik atas izin Allah

🕌.

KATA PENGANTAR

Assalamu 'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah rabbil 'alamin, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah ﷻ atas segala rahmat, karunia, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Optimasi Pemilihan Desain Model 3D Objek Ka’bah Menggunakan Metode TOPSIS dan PSO Berdasarkan Data Simulasi Pencetakan” dengan baik. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad ﷺ, yang telah menjadi suri teladan bagi umat manusia dalam menjalani kehidupan.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer pada Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa penyelesaian penelitian ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, doa, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan kerendahan hati, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nurdiana, M.Si., CAHRM., CRMP, selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. H. Agus Mulyono, S.Pd., M.Kes., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Supriyono, M.Kom., selaku Ketua Program Studi Teknik Informatika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

4. Dr. Ir. Fresy Nugroho, M.T, IPM., ASEAN Eng, selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan, serta motivasi kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini.
5. Hani Nurhayati, M.T, selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan saran, koreksi, dan arahan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lebih baik.
6. Prof. Dr. Ir. Muhammad Faisal, M.T dan Supriyono, M.Kom., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik, saran, dan masukan yang membangun demi penyempurnaan skripsi ini.
7. Nia Faricha, S.Si., selaku admin Program Studi Teknik Informatika, atas waktu dan tenaganya dalam memberikan bantuan, informasi, dan dukungan administratif dari proses awal masa studi hingga proses penyusunan skripsi ini terselesaikan.
8. Seluruh dosen, laboran, dan staf Program Studi Teknik Informatika yang telah memberikan ilmu, bantuan, dukungan, serta pelayanan akademik selama penulis menempuh masa studi.
9. Papa, Mama, dan Kakak tercinta yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, dukungan, motivasi, serta pengorbanan yang tidak ternilai kepada penulis. Segala doa, perhatian, dan dukungan yang diberikan menjadi sumber kekuatan bagi penulis dalam menyelesaikan pendidikan dan penyusunan skripsi ini.

10. Teman-teman seperjuangan yang telah kebersamai penulis selama masa perkuliahan, memberikan bantuan, semangat, dukungan, serta menjadi tempat berbagi cerita dan pengalaman dalam proses penyusunan skripsi ini.
11. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberikan doa, bantuan, serta dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan dan keterbatasan. Oleh karena itu, penulis dengan rendah hati menerima kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan dan pengembangan di masa yang akan datang. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, khususnya dalam bidang optimasi pemilihan desain model 3D dan simulasi pencetakan.

Wassalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Malang, 2026

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xv
ABSTRAK	xvi
ABSTRACT	xvii
الملخص.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II STUDI PUSTAKA	7
2.1 Penelitian Terkait.....	7
2.2 3D Printing	11
2.3 Ka'bah	13
2.4 Metode TOPSIS	15
2.4.1 Matriks Keputusan.....	15
2.4.2 Normalisasi Matriks Keputusan	15
2.4.3 Matriks Ternormalisasi Terbobot.....	16
2.4.4 Solusi Ideal Positif dan Solusi Ideal Negatif.....	16
2.4.5 Jarak Alternatif terhadap Solusi Ideal.....	16
2.4.6 Nilai Preferensi dan Perankingan	17
2.4.7 Kelebihan dan Keterbatasan Metode TOPSIS.....	17
2.5 <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO).....	18
2.5.1 Representasi Partikel	18
2.5.2 Kecepatan Partikel.....	19
2.5.3 Pembaruan Kecepatan Partikel.....	19
2.5.4 Pembaruan Posisi Partikel	19
2.5.5 Fungsi Tujuan PSO.....	19
2.5.6 Kelebihan dan Keterbatasan PSO.....	20
2.5.7 Peran PSO dalam Penelitian	20
2.6 Integrasi TOPSIS-PSO	20
BAB III DESAIN DAN IMPLEMENTASI.....	23
3.1 Desain Penelitian.....	23
3.2 Pengumpulan Data	24

3.2.1 Objek Penelitian dan Alternatif Desain	25
3.2.2 Kriteria Penilaian.....	27
3.2.3 Prosedur Pengumpulan Data Simulasi	29
3.2.4 Spesifikasi Simulasi Pencetakan	30
3.2.5 Perhitungan Biaya Pencetakan	31
3.2.6 Penyusunan Matriks Keputusan	33
3.3 Desain Sistem.....	34
3.4 Implementasi Metode TOPSIS-PSO	36
3.4.1 Representasi Partikel dan Parameter PSO	39
3.4.2 Normalisasi Matriks Keputusan dan Pembobotan	42
3.4.3 Evaluasi Fitness dan Mekanisme Iterasi PSO	43
3.4.4 Perankingan Akhir Alternatif.....	46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	48
4.1 Data Hasil Simulasi Pencetakan	48
4.1.1 Spesifikasi Simulasi.....	48
4.1.2 Data Kriteria Setiap Alternatif.....	49
4.2 Implementasi Metode TOPSIS-PSO	50
4.2.1 Inisialisasi Parameter PSO	51
4.2.2 Proses Normalisasi dan Evaluasi Fitness	52
4.2.3 Proses Iterasi dan Bobot Optimal	53
4.3 Hasil Perankingan Alternatif.....	56
4.3.1 Perhitungan TOPSIS dengan Bobot Optimal	57
4.3.2 Nilai Preferensi dan Peringkat Akhir.....	58
4.3.3 Desain Terbaik yang Direkomendasikan	60
4.4 Pembahasan.....	61
4.4.1 Analisis Bobot dan Hasil Perankingan	62
4.4.2 Perbandingan TOPSIS Bobot Equal vs TOPSIS-PSO	63
4.4.3 Analisis Trade-off Antar Kriteria.....	65
4.4.4 Keterbatasan Penelitian	67
4.5 Integrasi Sains dan Islam	68
4.5.1 Mu'amalah Ma'allah	69
4.5.2 Mu'amalah Ma'annas	71
BAB V KESIMPULAN.....	73
5.1.1 Kesimpulan.....	73
5.2 Saran.....	74
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian.....	24
Gambar 3.2 Variasi Model 3D Objek Ka'bah dalam Format STL: (a) STL 1, (b) STL 2, dan (c) STL 3.....	26
Gambar 3.3 Simulasi Pencetakan Model 3D pada PrusaSlicer.....	30
Gambar 3.4 Diagram Desain Sistem TOPSIS-PSO	36
Gambar 3.5 Diagram Alur Implementasi Metode TOPSIS-PSO.....	38
Gambar 4.1 Grafik Konvergensi Nilai Global Best PSO.....	54
Gambar 4.2 Grafik Bobot Optimal Kriteria Hasil PSO	56
Gambar 4.3 Grafik Nilai Preferensi Akhir Alternatif.....	59
Gambar 4.4 Grafik Perubahan Nilai Preferensi Berdasarkan Infill Density	66

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terkait.....	10
Tabel 3.1 Klasifikasi Data dalam Penelitian	25
Tabel 3.2 Alternatif Desain dan Variasi Infill Density	27
Tabel 3.3 Prosedur Pengumpulan Data Simulasi	29
Tabel 3.4 Spesifikasi Parameter Simulasi Pencetakan	31
Tabel 3.5 Komponen Penyusun Matriks Keputusan	33
Tabel 3.6 Parameter Algoritma PSO	40
Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi Pencetakan 3D.....	49
Tabel 4.2 Bobot Awal Setiap Partikel.....	51
Tabel 4.3 Kecepatan Awal Setiap Partikel	51
Tabel 4.4 Matriks Ternormalisasi Min-Max	52
Tabel 4.5 Matriks Ternormalisasi Vektor	53
Tabel 4.6 Perkembangan Nilai Global Best PSO.....	54
Tabel 4.7 Bobot Kriteria Optimal Hasil PSO.....	55
Tabel 4.8 Matriks Ternormalisasi Terbobot	57
Tabel 4.9 Solusi Ideal Positif dan Negatif.....	57
Tabel 4.10 Nilai Preferensi dan Peringkat Akhir Alternatif	58
Tabel 4.11 Perbandingan Distribusi Bobot Equal dan Bobot PSO	63
Tabel 4.12 Perbandingan Peringkat TOPSIS Equal vs TOPSIS-PSO.....	64
Tabel 4.13 Perbandingan Data Kriteria dan Nilai Preferensi Seluruh Alternatif	65

ABSTRAK

Akbar, Muhamad Maulana. 2026. **Optimasi Pemilihan Desain Model 3D Objek Ka'bah Menggunakan Metode TOPSIS dan PSO Berdasarkan Data Simulasi Pencetakan**. Skripsi. Program Studi Teknik Informatika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Dr. Ir. Fresy Nugroho, M.T., IPM., ASEAN Eng. (II) Hani Nurhayati, M.T.

Kata kunci: 3D Printing, Ka'bah, TOPSIS, Particle Swarm Optimization, Simulasi Pencetakan.

Teknologi 3D printing dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan media pembelajaran berbentuk model tiga dimensi, salah satunya miniatur Ka'bah sebagai alat peraga manasik haji. Namun, setiap desain model 3D memiliki karakteristik pencetakan yang berbeda, seperti waktu cetak, penggunaan material, biaya, dan kekuatan relatif hasil cetak. Penelitian ini bertujuan menerapkan metode Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) yang dioptimasi menggunakan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) untuk menentukan desain model 3D objek Ka'bah terbaik berdasarkan data simulasi pencetakan. Data penelitian diperoleh melalui simulasi pencetakan menggunakan PrusaSlicer terhadap sembilan alternatif desain yang merupakan kombinasi dari tiga model STL Ka'bah dan tiga variasi infill density, yaitu 20%, 40%, dan 60%. Kriteria yang digunakan meliputi waktu cetak, penggunaan filamen, biaya pencetakan, dan kekuatan relatif hasil cetak. Metode PSO digunakan untuk mengoptimasi bobot kriteria, sedangkan TOPSIS digunakan untuk menghitung nilai preferensi dan melakukan perankingan alternatif. Hasil optimasi PSO menghasilkan bobot sebesar 0,0437 untuk waktu cetak, 0,3875 untuk penggunaan filamen, 0,1675 untuk biaya pencetakan, dan 0,4013 untuk kekuatan relatif. Hasil perankingan menunjukkan bahwa alternatif A3, yaitu model STL 1 dengan infill density 60%, memperoleh nilai preferensi tertinggi sebesar 0,8440. Dengan demikian, alternatif A3 ditetapkan sebagai desain model 3D Ka'bah terbaik karena memiliki keseimbangan paling baik antara kekuatan relatif hasil cetak dan efisiensi sumber daya.

ABSTRACT

Akbar, Muhamad Maulana. 2026. **Optimization of 3D Model Design Selection for Ka’bah Object Using TOPSIS and PSO Methods Based on Printing Simulation Data.** Undergraduate Thesis. Department of Informatics Engineering, Faculty of Science and Technology, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Supervisors: (I) Dr. Ir. Fresy Nugroho, M.T., IPM., ASEAN Eng. (II) Hani Nurhayati, M.T.

3D printing technology can be utilized to produce three-dimensional learning media, one of which is a Ka’bah miniature used as a teaching aid for Hajj ritual practice. However, each 3D model design has different printing characteristics, such as printing time, material consumption, printing cost, and relative print strength. This study aims to apply the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method optimized using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to determine the best 3D model design of the Ka’bah based on printing simulation data. The research data were obtained through printing simulations using PrusaSlicer on nine design alternatives, which were generated from the combination of three Ka’bah STL models and three infill density variations, namely 20%, 40%, and 60%. The evaluation criteria used in this study consist of printing time, filament consumption, printing cost, and relative print strength. PSO was used to optimize the criteria weights, while TOPSIS was used to calculate preference values and rank the design alternatives. The PSO optimization results produced criteria weights of 0.0437 for printing time, 0.3875 for filament consumption, 0.1675 for printing cost, and 0.4013 for relative strength. The ranking results showed that alternative A3, namely STL model 1 with 60% infill density, obtained the highest preference value of 0.8440. Therefore, alternative A3 was selected as the best 3D model design of the Ka’bah because it provides the most balanced performance between relative print strength and resource efficiency.

Keywords: 3D Printing, Ka’bah, TOPSIS, Particle Swarm Optimization, Printing Simulation.

الملخص

أكبر، محمد مولانا. 2026. تحسين اختيار تصميم النموذج ثلاثي الأبعاد للكعبة باستخدام طريقة (PSO) وخوارزمية (TOPSIS) بناءً على بيانات محاكاة الطباعة. البحث الجامعي. قسم الهندسة المعلوماتية، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف الأول: د. المهندس فريسي نوغروهو، ماجستير في الهندسة؛ المشرف الثاني: هاني نور حياقي، ماجستير في الهندسة.

الكلمات الرئيسية: الطباعة ثلاثية الأبعاد، الكعبة، (PSO)، (TOPSIS)، محاكاة الطباعة.

تُعدّ تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد من التقنيات التي يمكن استخدامها في إنتاج الوسائل التعليمية على شكل نماذج مجسمة، ومنها نموذج الكعبة الذي يُستخدم وسيلةً تعليميةً في تدريب مناسك الحج. غير أن كل تصميم من تصاميم النماذج ثلاثية الأبعاد يمتلك خصائص طباعة مختلفة، مثل زمن الطباعة، واستهلاك الخيط الطباعي، وتكلفة الطباعة، والقوة النسبية للنتائج المطبوع. يهدف هذا البحث إلى تطبيق طريقة (PSO) المحسّنة باستخدام خوارزمية (TOPSIS) لتحديد أفضل تصميم للنموذج ثلاثي الأبعاد للكعبة بناءً على بيانات محاكاة الطباعة. تم الحصول على بيانات البحث من خلال محاكاة الطباعة باستخدام برنامج (PrusaSlicer) على تسعة بدائل تصميمية، وهي ناتجة عن دمج ثلاثة نماذج للكعبة بصيغة (STL) مع ثلاثة مستويات من كثافة الحشو، وهي 20% و 40% و 60%. وتتمثل معايير التقييم المستخدمة في زمن الطباعة، واستهلاك الخيط الطباعي، وتكلفة الطباعة، والقوة النسبية للنتائج المطبوع. استخدمت خوارزمية (PSO) لتحسين أوزان المعايير، في حين استخدمت طريقة (TOPSIS) لحساب قيم التفضيل وترتيب بدائل التصميم. أظهرت نتائج تحسين (PSO) أن وزن معيار زمن الطباعة بلغ 0.0437، ووزن استهلاك الخيط الطباعي 0.3875، ووزن تكلفة الطباعة 0.1675، ووزن القوة النسبية 0.4013. كما أظهرت نتائج الترتيب أن البديل (A3)، وهو النموذج (STL 1) بكثافة حشو 60%، حصل على أعلى قيمة تفضيل بلغت 0.8440. وبناءً على ذلك، تم اختيار البديل (A3) كأفضل تصميم للنموذج ثلاثي الأبعاد للكعبة، لأنه يحقق أفضل توازن بين القوة النسبية للنتائج المطبوع وكفاءة استخدام الموارد.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi manufaktur modern telah membawa perubahan signifikan dalam berbagai bidang industri. Salah satu teknologi yang mengalami kemajuan pesat adalah *3D printing* atau *Additive Manufacturing*, yaitu proses penciptaan objek tiga dimensi dengan cara menumpuk material lapis demi lapis berdasarkan model digital (Agrawaal & Thompson, 2021). Teknologi ini memberikan kemudahan dalam proses perancangan, efisiensi waktu produksi, serta kemampuan menghasilkan bentuk kompleks yang sulit dicapai oleh metode manufaktur konvensional.

Dalam praktiknya, teknologi *3D printing* tidak hanya dimanfaatkan untuk kebutuhan industri seperti pembuatan prototipe dan komponen teknik, tetapi juga berkembang sebagai media pembelajaran berbasis model tiga dimensi. Institusi pendidikan, sekolah, maupun pesantren dapat memanfaatkan teknologi ini untuk menghasilkan alat peraga edukatif secara mandiri dan kontekstual. Model tiga dimensi memungkinkan peserta didik memahami konsep abstrak atau objek yang sulit dijangkau secara langsung melalui representasi visual dan fisik yang lebih konkret. Namun demikian, meskipun suatu objek memiliki fungsi yang sama, variasi desain model 3D dapat menghasilkan perbedaan signifikan dalam waktu simulasi pencetakan, konsumsi material, estimasi biaya, serta karakteristik kekuatan hasil cetak (Turek, 2025). Kondisi ini menimbulkan kebutuhan akan suatu

sistem yang mampu menilai dan memilih desain terbaik berdasarkan berbagai kriteria teknis secara objektif.

Permasalahan utama yang muncul adalah bagaimana menentukan desain model yang terbaik ketika terdapat beberapa alternatif dengan fungsi serupa. Dalam konteks pendidikan, keterbatasan sumber daya seperti biaya material dan waktu produksi menjadi faktor penting dalam pengadaan media pembelajaran. Selama ini, pemilihan desain model 3D umumnya dilakukan berdasarkan pengalaman subjektif pengguna atau melalui uji coba manual menggunakan perangkat lunak slicer (Hepler & Davids, 2024). Pendekatan tersebut cenderung memerlukan waktu yang lebih lama serta tidak menjamin bahwa desain yang dipilih benar-benar merupakan alternatif terbaik. Kondisi ini menunjukkan adanya research gap antara kebutuhan akan proses pengambilan keputusan yang objektif dan berbasis data dengan praktik pemilihan desain yang masih bersifat manual.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, pendekatan *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) dapat diterapkan sebagai metode sistematis dalam mengevaluasi alternatif berdasarkan beberapa kriteria secara simultan. Salah satu metode MCDM yang banyak digunakan adalah *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) (Lamrini et al., 2023). Metode ini bekerja dengan menentukan alternatif terbaik berdasarkan kedekatannya terhadap solusi ideal positif dan kejauhannya dari solusi ideal negatif, sehingga mampu menghasilkan peringkat alternatif secara kuantitatif dan objektif.

Meskipun demikian, hasil perankingan TOPSIS sangat dipengaruhi oleh bobot kriteria yang digunakan. Penentuan bobot secara manual berpotensi

menimbulkan subjektivitas dan kurang mencerminkan kondisi data yang sebenarnya (Kizielewicz et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan optimasi yang mampu menentukan bobot kriteria secara otomatis dan adaptif terhadap karakteristik data. Salah satu algoritma optimasi yang efektif digunakan adalah *Particle Swarm Optimization* (PSO), yaitu algoritma metaheuristik berbasis populasi yang meniru perilaku sosial kawanan dalam mencari solusi terbaik secara kolektif (Shami et al., 2022). Melalui mekanisme iteratif, PSO dapat menyesuaikan bobot kriteria hingga diperoleh kombinasi yang menghasilkan kualitas keputusan yang lebih baik.

Integrasi antara TOPSIS dan PSO menghasilkan pendekatan hibrida yang menggabungkan kemampuan TOPSIS dalam memeringkat alternatif dengan kemampuan PSO dalam mengoptimalkan bobot kriteria. Dengan pendekatan ini, proses pemilihan desain model 3D dapat dilakukan secara lebih objektif, sistematis, dan berbasis data simulasi.

Dalam penelitian ini, objek yang digunakan adalah model 3D Ka'bah yang diposisikan sebagai media pembelajaran manasik haji dan pengenalan tata cara ibadah. Miniatur Ka'bah sering digunakan dalam kegiatan praktik manasik di sekolah, madrasah, maupun pesantren, khususnya bagi peserta didik yang belum memiliki kesempatan melihat langsung kondisi di Masjidil Haram. Representasi tiga dimensi menjadi penting agar media pembelajaran tersebut dapat diproduksi dengan biaya terjangkau dan waktu yang relatif singkat. Oleh karena itu, penelitian ini tidak berfokus pada pencetakan fisik, melainkan pada simulasi pencetakan untuk menganalisis efisiensi desain sebelum direalisasikan, sehingga dapat membantu

institusi pendidikan menentukan model yang paling sesuai dengan keterbatasan sumber daya yang dimiliki. Selain urgensi teknis dan ekonomis, upaya optimasi pemilihan desain ini juga sejalan dengan nilai-nilai fundamental dalam Islam terkait pemanfaatan teknologi dan material untuk kemaslahatan. Hal ini sebagaimana diisyaratkan oleh Allah ﷻ dalam Q.S. Al-Hadid ayat 25:

لَقَدْ أَرْسَلْنَا رُسُلَنَا بِالْبَيِّنَاتِ وَأَنْزَلْنَا مَعَهُمُ الْكِتَابَ وَالْمِيزَانَ لِيَقُومَ النَّاسُ بِالْقِسْطِ وَأَنْزَلْنَا الْحَدِيدَ فِيهِ بَأْسٌ شَدِيدٌ وَمَنْفَعٌ لِلنَّاسِ وَلِيَعْلَمَ اللَّهُ مَنْ يَنْصُرُهُ وَرُسُلَهُ بِالْغَيْبِ إِنَّ اللَّهَ قَوِيٌّ عَزِيزٌ ﴿٢٥﴾

“Sesungguhnya Kami telah mengutus rasul-rasul Kami dengan membawa bukti-bukti yang nyata dan telah Kami turunkan bersama mereka Al Kitab dan neraca (keadilan) supaya manusia dapat melaksanakan keadilan. Dan Kami ciptakan besi yang padanya terdapat kekuatan yang hebat dan berbagai manfaat bagi manusia, (supaya mereka mempergunakan besi itu) dan supaya Allah mengetahui siapa yang menolong (agama)Nya dan rasul-rasul-Nya padahal Allah tidak dilihatnya. Sesungguhnya Allah Maha Kuat lagi Maha Perkasa.” (Q.S. Al-Hadid: 25).

1.2 Rumusan Masalah

Bagaimana menerapkan metode TOPSIS yang dioptimasi menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk menentukan desain model 3D objek Ka’bah yang terbaik berdasarkan data simulasi pencetakan?.

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan tidak meluas dari tujuan utama, maka batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Penelitian ini menggunakan data yang diperoleh dari hasil simulasi pencetakan 3D terhadap beberapa alternatif desain model 3D objek Ka’bah, sehingga tidak dilakukan proses pencetakan fisik maupun pengujian eksperimental secara langsung.

- b. Material pencetakan 3D dalam simulasi dibatasi pada satu jenis filament, sehingga pengaruh perbedaan jenis material terhadap hasil simulasi tidak dianalisis.
- c. Parameter pencetakan selain yang dianalisis dalam penelitian ini, seperti *layer height*, *nozzle diameter*, *printing speed*, serta suhu *nozzle* dan *heated bed*, diasumsikan konstan selama proses simulasi.
- d. Kekuatan hasil cetak tidak diuji menggunakan pengujian mekanik langsung seperti uji tarik atau uji tekan, melainkan direpresentasikan melalui parameter *infill density* sebagai indikator kekuatan relatif dalam simulasi.
- e. Kriteria evaluasi dalam proses pengambilan keputusan dibatasi pada empat kriteria, yaitu waktu simulasi pencetakan, konsumsi material, biaya pencetakan, dan kekuatan relatif hasil cetak, sehingga aspek kualitas lainnya seperti akurasi dimensi dan kualitas permukaan tidak dianalisis.
- f. Metode pengambilan keputusan multikriteria yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi pada metode TOPSIS dengan optimasi bobot kriteria menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO), tanpa membandingkannya dengan metode MCDM atau algoritma optimasi lainnya.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk menerapkan metode TOPSIS yang dioptimasi menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) dalam menentukan desain model 3D objek Ka'bah yang terbaik berdasarkan data simulasi pencetakan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

- a. Memberikan solusi sistematis dan berbasis data dalam proses pemilihan desain model 3D objek Ka'bah melalui penerapan metode TOPSIS yang dioptimasi menggunakan algoritma PSO berdasarkan data simulasi pencetakan, sehingga membantu pengguna dalam menentukan desain terbaik untuk proses pencetakan.
- b. Memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan metode *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) dan algoritma optimasi, khususnya pada integrasi metode TOPSIS dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) dalam konteks evaluasi desain berbasis simulasi 3D printing.
- c. Menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan integrasi antara metode pengambilan keputusan dan algoritma optimasi dalam berbagai permasalahan teknis dan rekayasa sistem.

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian mengenai optimasi pada teknologi *Additive Manufacturing* atau *3D printing* telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir. Berbagai pendekatan dikembangkan untuk meningkatkan kualitas hasil cetak, efisiensi waktu produksi, serta penggunaan material. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah metode pengambilan keputusan multikriteria (*Multi-Criteria Decision Making* / MCDM) serta algoritma optimasi berbasis *metaheuristic*.

Penelitian yang dilakukan oleh Tanoto et al. (2022) menerapkan metode Taguchi yang dikombinasikan dengan TOPSIS untuk mendukung proses pemilihan parameter pada 3D printing material ABS. Fokus utama penelitian ini adalah mencari kombinasi parameter proses yang menghasilkan respon multi-objektif terbaik, meliputi kekuatan tarik, akurasi dimensi, dan waktu proses. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi metode tersebut mampu menghasilkan pemeringkatan alternatif eksperimen secara sistematis sehingga meningkatkan kualitas hasil cetak.

Selanjutnya, Wang & Tang (2025) mengembangkan pendekatan *Entropy Weight* TOPSIS yang digabungkan dengan algoritma RSM-NSGA-II untuk meningkatkan akurasi pencetakan FDM (*Fused Deposition Modeling*) dalam mode produksi rendah karbon. Penelitian ini bertujuan menyeimbangkan aspek akurasi geometris dengan konsumsi energi. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa metode

TOPSIS efektif dalam menyeleksi solusi dari himpunan Pareto berdasarkan beberapa kriteria yang saling bertentangan.

Studi oleh Der & Başar (2025) juga memanfaatkan metode TOPSIS untuk mengevaluasi kualitas pemotongan laser CO₂ pada produk *3D printed* berbahan PLA. Penelitian ini menggunakan TOPSIS sebagai alat pengambilan keputusan untuk menentukan parameter pemotongan terbaik berdasarkan kriteria kekasaran permukaan dan lebar garitan (*kerf width*). Temuan ini menunjukkan bahwa TOPSIS dapat digunakan dalam menangani permasalahan seleksi parameter dengan banyak kriteria respons

Di sisi lain, penggunaan algoritma optimasi metaheuristik seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) juga telah banyak diterapkan dalam domain ini. Oberloier et al. (2023) mengimplementasikan PSO melalui perangkat lunak sumber terbuka untuk mencari parameter pencetakan pada material daur ulang. Sistem yang dikembangkan mampu mengeksplorasi ruang pencarian parameter secara otomatis, sehingga dapat mengurangi kegagalan cetak dan meningkatkan kualitas material.

Penelitian serupa oleh Shao (2024) menerapkan algoritma PSO untuk menentukan parameter proses pencetakan 3D pada objek patung keramik. Tujuan penelitian ini adalah mengatasi masalah deformasi dan keretakan yang sering terjadi pada pencetakan material pasta. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PSO mampu mempercepat proses pencarian solusi serta meningkatkan stabilitas bentuk dan efisiensi waktu proses.

Terkait integrasi metode pengambilan keputusan dengan optimasi, penelitian yang dilakukan oleh Doan Tat et al. (2024) mengusulkan pendekatan

hybrid yang menggabungkan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) dengan metode TOPSIS dalam proses optimasi multi-objektif pada teknologi *Laser Direct Metal Deposition* (LDMD) berbahan stainless steel 316L. Dalam penelitian tersebut, PSO digunakan untuk menghasilkan kombinasi parameter proses, sedangkan TOPSIS berperan dalam melakukan evaluasi dan pemeringkatan solusi berdasarkan beberapa kriteria performa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi kedua metode tersebut dapat digunakan dalam menentukan parameter proses manufaktur aditif secara sistematis.

Berdasarkan tinjauan pustaka tersebut, dapat disimpulkan bahwa metode TOPSIS dan PSO telah banyak digunakan dalam permasalahan optimasi pada teknologi 3D printing, khususnya dalam penentuan parameter proses pencetakan. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa integrasi antara PSO dan TOPSIS dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan multi-kriteria. Namun demikian, penelitian-penelitian tersebut umumnya berfokus pada optimasi parameter mesin atau pengaturan proses pencetakan (*slicer settings*).

Hingga saat ini masih terbatas penelitian yang mengkaji penerapan integrasi metode TOPSIS dan PSO untuk pemilihan desain model 3D sebelum proses pencetakan dilakukan, khususnya dengan mempertimbangkan kriteria efisiensi waktu cetak, penggunaan material, biaya produksi, dan kekuatan hasil cetak. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada penerapan metode TOPSIS yang dioptimasi menggunakan PSO untuk menentukan desain model 3D objek Ka'bah yang terbaik berdasarkan data simulasi pencetakan.

Tabel 2.1 Penelitian Terkait

No	Judul	Metode	Fokus Penelitian	Kelebihan Penelitian	Keterbatasan / Gap
1	Optimasi Multirespon pada Proses 3D Printing Material ABS (Tanoto et al., 2022)	Taguchi - PCR - TOPSIS	Parameter proses 3D Printing (Material ABS)	Metode hibrida Taguchi-TOPSIS terbukti efektif meranking eksperimen untuk mendapatkan kombinasi parameter terbaik (kekuatan & akurasi).	Penelitian hanya berfokus pada optimasi parameter proses pencetakan dan belum membahas pemilihan desain model 3D serta tidak menggunakan metode PSO
2	Enhanced FDM Printing Accuracy... Using RSM-NSGA-II and Entropy Weight TOPSIS (Wang & Tang, 2025)	Entropy Weight - TOPSIS	Akurasi FDM Printing & Konsumsi Energi	TOPSIS berhasil menyeleksi solusi terbaik dari himpunan Pareto untuk menyeimbangkan akurasi cetak dan efisiensi energi.	Penelitian hanya fokus pada optimasi kualitas hasil cetak dan tidak mengintegrasikan metode optimasi lain seperti PSO
3	TOPSIS-based multi-response optimization for improving CO2 laser cutting quality of 3D printed PLA (Der & Başar, 2025)	TOPSIS	Kualitas post-processing (Laser cutting) pada PLA	TOPSIS mampu menentukan parameter pemotongan terbaik yang meminimalkan kekasaran permukaan dan lebar kerf pada produk PLA.	Tidak membahas optimasi desain model 3D serta tidak menggunakan metode optimasi berbasis swarm seperti PSO
4	Finding Ideal Parameters for Recycled Material... Using PSO (Oberloier et al., 2023)	Particle Swarm Optimization (PSO)	Parameter pencetakan material daur ulang	Algoritma PSO berhasil mengotomatisasi pencarian parameter yang sesuai untuk mengurangi kegagalan cetak pada material limbah/daur ulang.	Penelitian tidak menggunakan metode pengambilan keputusan multikriteria seperti TOPSIS
5	Parameter optimization of 3D	Particle Swarm	Parameter 3D	PSO efektif mempercepat konvergensi solusi	Penelitian tidak menggabungkan metode

No	Judul	Metode	Fokus Penelitian	Kelebihan Penelitian	Keterbatasan / Gap
	printing process for ceramic sculptures (Shao, 2024)	Optimization (PSO)	Printing Keramik	untuk mengurangi deformasi dan meningkatkan stabilitas bentuk patung keramik cetak.	pengambilan keputusan multikriteria seperti TOPSIS dan tidak membahas pemilihan desain model
6	Prediction Models and Multi-Objective Optimization of the Single Deposited Tracks in Laser Direct Metal Deposition of 316L Stainless Steel (Doan Tat et al., 2024)	PSO - TOPSIS	Optimasi parameter proses pada teknologi Laser Direct Metal Deposition	Integrasi PSO dan TOPSIS mampu menyelesaikan permasalahan optimasi multi-objektif dalam menentukan parameter proses manufaktur aditif secara sistematis.	Penelitian berfokus pada optimasi parameter proses pencetakan logam dan belum membahas pemilihan desain model 3D sebelum proses pencetakan berdasarkan data simulasi.

2.2 3D Printing

3D Printing, atau yang lebih dikenal sebagai *Additive Manufacturing*, merupakan teknologi manufaktur modern yang memungkinkan proses pembuatan objek tiga dimensi dengan cara menumpuk material secara berlapis berdasarkan model digital (Agrawaal & Thompson, 2021). Berbeda dengan metode manufaktur subtraktif yang membutuhkan pemotongan atau pengurangan material, *3D printing* menawarkan pendekatan yang lebih efisien karena hanya menggunakan material sesuai bentuk yang dirancang. Teknologi ini banyak digunakan dalam berbagai bidang seperti pendidikan, *prototyping* industri, kesehatan, arsitektur, hingga

manufaktur produk fungsional karena kemampuannya menghasilkan bentuk kompleks dan presisi dalam waktu relatif singkat.

Dalam proses pencetakannya, model 3D terlebih dahulu diproses menggunakan perangkat lunak *slicer* untuk menghasilkan instruksi *G-code* yang berisi pengaturan jalur ekstrusi, ketebalan layer, kecepatan cetak, dan struktur *infill*. Beberapa parameter utama seperti *layer height*, *printing speed*, *infill density*, *nozzle temperature*, dan penggunaan *support* sangat mempengaruhi hasil akhir objek, baik dari segi kekuatan, waktu cetak, maupun konsumsi material (Turek, 2025). Karena setiap variasi desain memiliki struktur geometris yang berbeda, maka model yang secara visual mirip pun dapat menghasilkan waktu cetak dan penggunaan material yang sangat berbeda.

Teknologi 3D printing jenis *Fused Deposition Modeling* (FDM) menjadi salah satu yang paling populer karena biayanya yang relatif rendah dan kemudahan pengoperasiannya (Rashidi Mehrabadi et al., 2025). Namun, tantangan utama dalam FDM adalah menentukan desain serta kombinasi parameter cetak yang terbaik untuk mencapai efisiensi. Hal ini menjadi semakin penting ketika banyak alternatif desain model yang harus dipertimbangkan, di mana masing-masing memiliki karakteristik dan kebutuhan pencetakan yang berbeda. Oleh karena itu, diperlukan analisis dan metode sistematis untuk menilai berbagai alternatif desain tersebut secara objektif berdasarkan kriteria teknis yang terukur, seperti waktu pencetakan, konsumsi material, biaya, dan kekuatan hasil cetak.

Dengan demikian, pemahaman mengenai prinsip kerja 3D printing serta faktor-faktor yang mempengaruhi proses pencetakannya menjadi landasan penting

dalam penelitian yang berfokus pada pemilihan desain model 3D terbaik. Teknologi ini memberikan konteks bagi penerapan metode pengambilan keputusan dan algoritma optimasi dalam upaya meningkatkan efisiensi dan kualitas pencetakan.

2.3 Ka'bah

Ka'bah merupakan bangunan suci umat Islam yang terletak di dalam kompleks Masjidil Haram di Kota Makkah. Ka'bah menjadi kiblat bagi umat Islam di seluruh dunia dalam melaksanakan ibadah salat serta menjadi pusat pelaksanaan ibadah haji dan umrah. Secara arsitektural, Ka'bah berbentuk bangunan prisma segi empat yang menyerupai kubus dengan proporsi geometris yang jelas dan tegas (Maspul, 2025). Bentuknya yang sederhana namun simetris menjadikan Ka'bah mudah direpresentasikan dalam bentuk model tiga dimensi dan sering digunakan sebagai objek miniatur dalam berbagai kegiatan edukatif.

Dalam perspektif sejarah Islam, Ka'bah diyakini pertama kali dibangun oleh Nabi Ibrahim bersama putranya Nabi Ismail atas perintah Allah ﷻ (Mat Zain & Kamaruzaman, 2022). Pembangunan tersebut disebutkan dalam Al-Qur'an (QS. Al-Baqarah [2]: 127) sebagai bentuk ketaatan dan penegasan tauhid. Sepanjang sejarahnya, bangunan Ka'bah mengalami beberapa kali renovasi akibat faktor alam maupun peristiwa sosial, termasuk pada masa suku Quraisy sebelum kerasulan Nabi Muhammad ﷺ dan pada periode kekhalifahan Islam. Meskipun mengalami perubahan struktur fisik, fungsi utama Ka'bah sebagai pusat ibadah dan simbol persatuan umat Islam tetap terjaga hingga saat ini.

Secara fisik, Ka'bah memiliki tinggi sekitar 13 meter dengan panjang sisi yang tidak sepenuhnya sama, yaitu kurang lebih 11 hingga 13 meter pada masing-

masing sisinya (Lail et al., 2026). Pada salah satu sudutnya terdapat Hajar Aswad yang memiliki nilai historis dan spiritual penting dalam pelaksanaan ibadah haji dan umrah. Karakteristik geometris yang tegas, sudut siku, serta bentuk dasar yang relatif sederhana menjadikan Ka'bah sebagai objek yang sesuai untuk dimodelkan menggunakan perangkat lunak desain berbasis CAD dan dianalisis dalam konteks manufaktur aditif.

Penggunaan replika atau miniatur Ka'bah merupakan hal yang lazim ditemui dalam kegiatan manasik haji di lingkungan pendidikan. Kehadiran model fisik ini berfungsi sebagai alat peraga untuk memberikan gambaran visual mengenai tata cara ibadah dan arah pergerakan di tanah suci. Seiring kemudahan akses terhadap berbagai metode pembuatan model, institusi pendidikan kini memiliki pilihan untuk menyiapkan alat peraga mandiri yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan praktikum siswa

Pemilihan model Ka'bah dalam penelitian ini didasarkan pada pertimbangan edukatif dan teknis. Dari sisi edukatif, model ini memiliki fungsi pembelajaran yang jelas dan banyak digunakan dalam praktik manasik. Dari sisi teknis, bentuk geometrisnya yang terstruktur memungkinkan dilakukan variasi desain serta analisis parameter pencetakan seperti waktu simulasi, konsumsi material, estimasi biaya, dan kekuatan relatif melalui pengaturan infill density. Dengan demikian, pembahasan mengenai Ka'bah dalam penelitian ini tidak hanya bersifat historis atau religius, tetapi juga sebagai landasan konseptual atas pemilihan objek model 3D yang dianalisis menggunakan pendekatan optimasi berbasis TOPSIS dan PSO.

2.4 Metode TOPSIS

Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

merupakan salah satu metode *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) yang digunakan untuk menentukan alternatif terbaik berdasarkan kedekatannya terhadap solusi ideal positif dan kejauhan dari solusi ideal negatif (Hezer et al., 2021). Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh Hwang & Yoon dan banyak digunakan pada permasalahan pengambilan keputusan multikriteria karena konsepnya yang sederhana, logis, dan mudah diimplementasikan.

Prinsip dasar TOPSIS menyatakan bahwa alternatif terbaik adalah alternatif yang memiliki jarak terpendek dari solusi ideal positif dan jarak terjauh dari solusi ideal negatif (Hezer et al., 2021). Solusi ideal positif merepresentasikan kondisi terbaik dari seluruh kriteria, sedangkan solusi ideal negatif merepresentasikan kondisi terburuk dari seluruh kriteria.

2.4.1 Matriks Keputusan

Proses TOPSIS diawali dengan pembentukan matriks keputusan X yang berisi nilai setiap alternatif terhadap masing-masing kriteria.

$$X = [x_{ij}], \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

di mana:

x_{ij} = nilai alternatif ke- i pada kriteria ke- j

m = jumlah alternatif

n = jumlah kriteria

2.4.2 Normalisasi Matriks Keputusan

Normalisasi dilakukan untuk menghilangkan perbedaan skala antar kriteria sehingga seluruh nilai dapat dibandingkan secara adil. Metode normalisasi yang

umum digunakan pada TOPSIS adalah normalisasi vektor dengan hasil normalisasi membentuk matriks ternormalisasi $R = [r_{ij}]$.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2.2)$$

2.4.3 Matriks Ternormalisasi Terbobot

Setelah proses normalisasi, setiap kriteria diberikan bobot sesuai tingkat kepentingannya. Matriks ternormalisasi terbobot diperoleh dengan mengalikan nilai normalisasi dengan bobot masing-masing kriteria.

$$y_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad (2.3)$$

dengan:

w_j = bobot kriteria ke- j

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1$$

2.4.4 Solusi Ideal Positif dan Solusi Ideal Negatif

Solusi ideal positif dan negatif ditentukan berdasarkan jenis kriteria, yaitu kriteria keuntungan (*benefit*) dan kriteria biaya (*cost*).

Solusi ideal positif dirumuskan sebagai:

$$A^+ = \max(y_{ij}) \mid j \in \text{benefit}; ; \min(y_{ij}) \mid j \in \text{cost} \quad (2.4)$$

Sedangkan solusi ideal negatif dirumuskan sebagai:

$$A^- = \min(y_{ij}) \mid j \in \text{benefit}; ; \max(y_{ij}) \mid j \in \text{cost} \quad (2.5)$$

2.4.5 Jarak Alternatif terhadap Solusi Ideal

Jarak setiap alternatif terhadap solusi ideal positif dan negatif dihitung menggunakan jarak Euclidean.

Jarak terhadap solusi ideal positif:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - A_j^+)^2} \quad (2.6)$$

Jarak terhadap solusi ideal negatif:

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - A_j^-)^2} \quad (2.7)$$

2.4.6 Nilai Preferensi dan Perankingan

Nilai preferensi setiap alternatif dihitung untuk menentukan tingkat kedekatan relatif terhadap solusi ideal positif.

$$V_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (2.8)$$

Nilai V_i berada pada rentang 0 hingga 1. Alternatif dengan nilai preferensi terbesar menunjukkan alternatif terbaik berdasarkan kriteria yang digunakan.

2.4.7 Kelebihan dan Keterbatasan Metode TOPSIS

Metode TOPSIS memiliki kelebihan berupa konsep yang sederhana, kemampuan menangani banyak kriteria, serta menghasilkan perankingan alternatif yang jelas (Taherdoost & Madanchian, 2024). Namun, TOPSIS memiliki keterbatasan dalam penentuan bobot kriteria yang masih bersifat subjektif apabila ditentukan secara manual (Kizielewicz et al., 2024). Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* untuk mengoptimasi bobot kriteria agar hasil keputusan menjadi lebih objektif.

2.5 Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan algoritma optimasi berbasis populasi yang terinspirasi dari perilaku sosial kawanan, seperti pergerakan burung atau ikan dalam mencari sumber makanan (Chernyak et al., 2025). PSO bekerja dengan memanfaatkan sekumpulan partikel yang bergerak di dalam ruang solusi untuk mencari solusi optimal berdasarkan fungsi tujuan tertentu. Setiap partikel merepresentasikan solusi kandidat dan akan memperbarui posisinya secara iteratif berdasarkan pengalaman terbaiknya sendiri dan pengalaman terbaik dari seluruh populasi (Chernyak et al., 2025).

Dalam PSO, setiap partikel memiliki dua atribut utama, yaitu posisi dan kecepatan (Shami et al., 2022). Posisi partikel menyatakan solusi kandidat, sedangkan kecepatan menentukan arah dan besar pergerakan partikel menuju solusi yang lebih baik.

2.5.1 Representasi Partikel

Pada algoritma PSO, posisi partikel dinyatakan sebagai vektor berdimensi d , yang merepresentasikan parameter yang akan dioptimasi.

$$x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}] \quad (2.9)$$

di mana x_i adalah posisi partikel ke- i , dan d merupakan jumlah dimensi permasalahan. Dalam konteks penelitian ini, dimensi partikel merepresentasikan bobot kriteria pada metode TOPSIS.

2.5.2 Kecepatan Partikel

Setiap partikel memiliki kecepatan yang menentukan perubahan posisi pada setiap iterasi.

$$v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}] \quad (2.10)$$

Kecepatan ini akan diperbarui berdasarkan pengalaman partikel dan informasi global dari populasi.

2.5.3 Pembaruan Kecepatan Partikel

Pembaruan kecepatan partikel dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$v_i^{t+1} = \omega \cdot v_i^t + c_1 r_1 (p_{best,i} - x_i^t) + c_2 r_2 (g_{best} - x_i^t) \quad (2.11)$$

Dengan keterangan :

ω = faktor inersia

c_1, c_2 = koefisien pembelajaran

r_1, r_2 = bilangan acak dalam rentang $[0,1]$

$p_{best,i}$ = posisi terbaik partikel ke- i

g_{best} = posisi terbaik global

2.5.4 Pembaruan Posisi Partikel

Setelah kecepatan diperbarui, posisi partikel dihitung menggunakan persamaan:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (2.12)$$

Pembaruan posisi ini dilakukan secara iteratif hingga kondisi berhenti terpenuhi, seperti jumlah iterasi maksimum atau konvergensi solusi.

2.5.5 Fungsi Tujuan PSO

Algoritma PSO memerlukan fungsi tujuan (*fitness function*) untuk mengevaluasi kualitas setiap solusi kandidat. Fungsi tujuan ini digunakan sebagai dasar untuk memperbarui nilai terbaik partikel secara individu (*personal best*)

maupun secara global (*global best*) dalam setiap iterasi (Amal et al., 2024). Dalam penelitian ini, fungsi tujuan dirancang untuk mengevaluasi kualitas bobot kriteria yang digunakan pada metode TOPSIS sehingga menghasilkan perankingan alternatif terbaik.

2.5.6 Kelebihan dan Keterbatasan PSO

PSO memiliki kelebihan berupa struktur algoritma yang sederhana, kemampuan konvergensi yang cepat, serta mudah diintegrasikan dengan metode lain (Shami et al., 2022). Namun, PSO juga memiliki keterbatasan, seperti sensitivitas terhadap parameter algoritma dan kemungkinan terjebak pada solusi lokal (Shami et al., 2022). Oleh karena itu, pemilihan parameter PSO perlu dilakukan secara hati-hati agar diperoleh hasil optimasi terbaik.

2.5.7 Peran PSO dalam Penelitian

Dalam penelitian ini, PSO digunakan sebagai metode optimasi untuk menentukan bobot kriteria pada metode TOPSIS. Dengan memanfaatkan PSO, proses penentuan bobot tidak lagi bergantung pada penilaian subjektif, melainkan diperoleh melalui proses optimasi berbasis fungsi tujuan. Integrasi PSO dan TOPSIS diharapkan mampu menghasilkan pemilihan desain model 3D yang terbaik dan lebih objektif.

2.6 Integrasi TOPSIS-PSO

Integrasi antara metode *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) merupakan pendekatan yang menggabungkan proses optimasi bobot kriteria dengan

perankingan alternatif dalam pengambilan keputusan multikriteria. Metode TOPSIS digunakan untuk menentukan alternatif terbaik berdasarkan kedekatannya terhadap solusi ideal positif dan kejauhannya dari solusi ideal negatif (Hezer et al., 2021). Namun demikian, hasil perankingan TOPSIS sangat dipengaruhi oleh bobot kriteria yang digunakan, sehingga penentuan bobot menjadi aspek penting dalam proses pengambilan keputusan (Kizielewicz et al., 2024).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, PSO digunakan untuk memperoleh bobot kriteria yang optimal secara otomatis. PSO bekerja dengan memanfaatkan sekumpulan partikel yang merepresentasikan kandidat bobot kriteria dan bergerak dalam ruang solusi untuk mencari kombinasi bobot terbaik. Setiap partikel akan diperbarui secara iteratif berdasarkan pengalaman terbaik individu (*personal best*) dan pengalaman terbaik global (*global best*) (Chernyak et al., 2025).

Dalam proses integrasi ini, setiap partikel yang dihasilkan oleh PSO akan dievaluasi menggunakan metode TOPSIS. Bobot kriteria yang direpresentasikan oleh partikel digunakan dalam perhitungan TOPSIS untuk menghasilkan nilai preferensi setiap alternatif. Nilai preferensi tersebut kemudian digunakan sebagai fungsi evaluasi (*fitness function*) dalam proses optimasi PSO. Dengan demikian, bobot kriteria yang menghasilkan kualitas perankingan terbaik akan dipertahankan dan dikembangkan pada iterasi berikutnya.

Proses optimasi dilakukan secara iteratif hingga diperoleh bobot kriteria yang optimal dan stabil. Setelah proses optimasi selesai, bobot optimal tersebut digunakan dalam perhitungan TOPSIS untuk menentukan peringkat akhir setiap

alternatif desain. Hasil akhir dari proses ini adalah alternatif desain model 3D yang terbaik berdasarkan kriteria yang telah ditentukan.

Pendekatan integrasi TOPSIS-PSO telah diterapkan dalam berbagai permasalahan optimasi pada bidang manufaktur aditif. Penelitian oleh Doan Tat et al. (2024) pada proses *Laser Direct Metal Deposition* (LDMD) menunjukkan bahwa kombinasi kedua metode tersebut dapat digunakan dalam proses pengambilan keputusan multikriteria yang melibatkan parameter teknis yang kompleks. Dalam konteks tersebut, PSO digunakan untuk menentukan bobot kriteria, sedangkan TOPSIS digunakan untuk mengevaluasi dan memeringkat alternatif berdasarkan bobot yang dihasilkan.

Dengan demikian, integrasi TOPSIS dan PSO dalam penelitian ini digunakan untuk mendukung proses pemilihan desain model 3D secara sistematis dan berbasis data. Pendekatan ini memungkinkan penentuan bobot kriteria secara objektif melalui proses optimasi, serta menghasilkan peringkat alternatif yang dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan desain terbaik sebelum proses pencetakan dilakukan.

BAB III

DESAIN DAN IMPLEMENTASI

3.1 Desain Penelitian

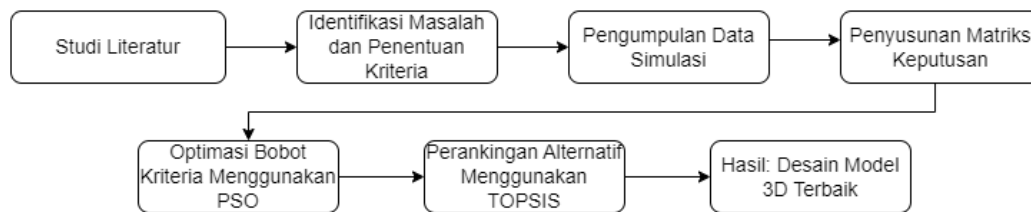
Penelitian ini dirancang untuk menentukan desain model 3D objek Ka'bah yang terbaik berdasarkan data simulasi pencetakan dengan menggunakan metode *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) yang dioptimasi menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO).

Objek penelitian berupa beberapa alternatif desain model 3D Ka'bah dalam format STL. Setiap alternatif dievaluasi berdasarkan empat kriteria, yaitu waktu pencetakan, penggunaan filamen, biaya pencetakan, dan kekuatan relatif hasil cetak. Data untuk masing-masing kriteria diperoleh melalui proses simulasi pencetakan menggunakan perangkat lunak *slicer*.

Metode yang digunakan merupakan integrasi antara TOPSIS dan PSO. TOPSIS digunakan untuk menghitung nilai preferensi dan melakukan perankingan alternatif, sedangkan PSO digunakan untuk memperoleh bobot kriteria yang optimal. Dalam prosesnya, setiap partikel pada PSO merepresentasikan kandidat bobot kriteria, kemudian dievaluasi menggunakan TOPSIS untuk menghasilkan nilai preferensi alternatif. Nilai tersebut digunakan sebagai dasar dalam proses optimasi hingga diperoleh bobot terbaik.

Setelah proses optimasi selesai, bobot optimal digunakan kembali dalam perhitungan TOPSIS untuk menghasilkan peringkat akhir alternatif desain. Hasil akhir penelitian ini adalah urutan alternatif desain model 3D Ka'bah berdasarkan

tingkat kedekatannya terhadap solusi ideal sehingga dapat ditentukan desain terbaik.



Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian

Alur penelitian pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1. Penelitian diawali dengan studi literatur, dilanjutkan dengan identifikasi masalah dan penentuan kriteria, pengumpulan data simulasi, penyusunan matriks keputusan, optimasi bobot menggunakan PSO, dan perankingan alternatif menggunakan TOPSIS. Dari tahapan tersebut diperoleh desain model 3D terbaik yang direkomendasikan.

3.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan untuk memperoleh data kuantitatif yang digunakan sebagai masukan dalam perhitungan metode TOPSIS-PSO. Data yang digunakan bukan berasal dari hasil pencetakan fisik secara langsung, melainkan diperoleh melalui simulasi pencetakan 3D menggunakan perangkat lunak PrusaSlicer.

Dalam penelitian ini, model 3D Ka'bah dalam format STL berperan sebagai objek awal yang disimulasikan. Hasil simulasi tersebut berupa data numerik, yaitu waktu cetak, penggunaan filamen, estimasi biaya pencetakan, serta nilai infill density yang digunakan sebagai representasi kekuatan relatif hasil cetak. Seluruh

data tersebut kemudian disusun ke dalam matriks keputusan sebagai input dalam proses perhitungan TOPSIS-PSO. Untuk memperjelas jenis data yang digunakan dalam penelitian ini, klasifikasi data penelitian disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Klasifikasi Data dalam Penelitian

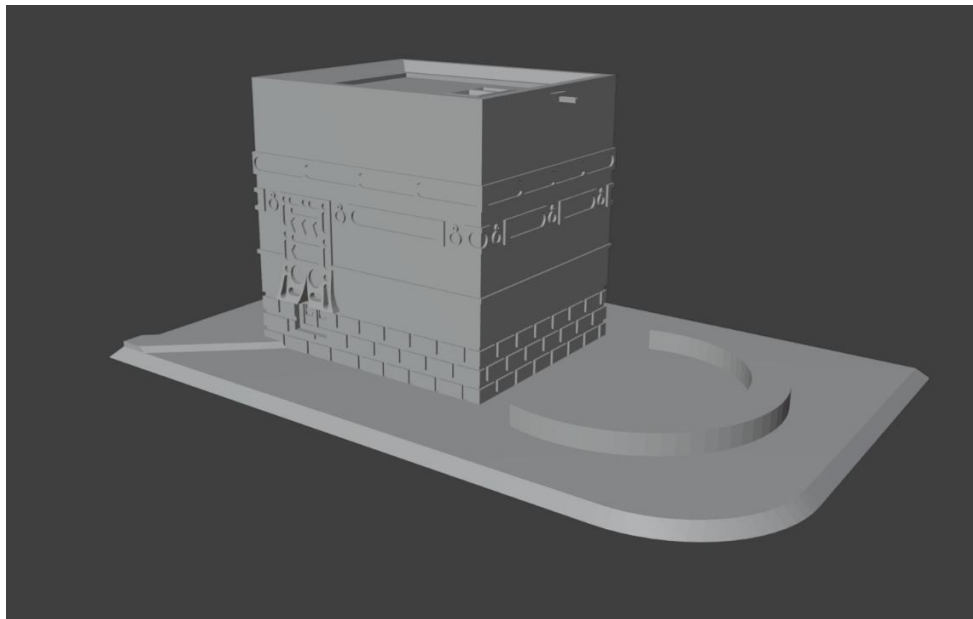
Jenis Data	Bentuk Data	Sumber Data	Fungsi dalam Penelitian
Model 3D	File STL objek Ka'bah	Model desain 3D	Objek awal simulasi pencetakan
Data simulasi pencetakan	Waktu cetak dan penggunaan filamen	Hasil slicing PrusaSlicer	Nilai kriteria C1 dan C2
Data biaya pencetakan	Estimasi biaya pencetakan	Perhitungan biaya filamen dan listrik	Nilai kriteria C3
Data kekuatan relatif	Infill density 20%, 40%, dan 60%	Parameter simulasi	Nilai kriteria C4
Matriks keputusan	9 alternatif $\times$ 4 kriteria	Rekapitulasi data	Input metode TOPSIS-PSO

Berdasarkan Tabel 3.1, data penelitian dibedakan menjadi data objek, data hasil simulasi, data hasil perhitungan, dan data yang digunakan sebagai input metode.

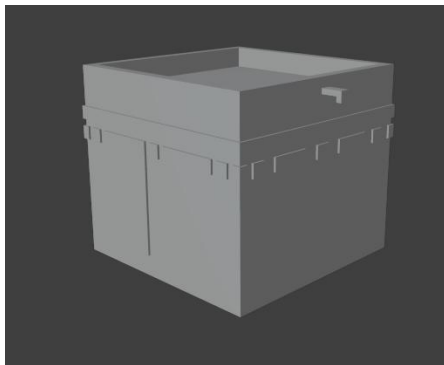
3.2.1 Objek Penelitian dan Alternatif Desain

Objek penelitian dalam penelitian ini adalah model 3D objek Ka'bah dalam format STL. Model 3D tersebut digunakan sebagai objek awal dalam proses simulasi pencetakan menggunakan perangkat lunak PrusaSlicer. Pemilihan objek Ka'bah didasarkan pada fungsinya sebagai media pembelajaran manasik haji yang dapat direpresentasikan dalam bentuk model tiga dimensi.

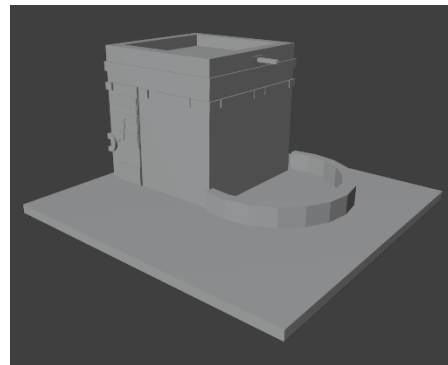
Dalam penelitian ini digunakan tiga model STL Ka'bah yang memiliki karakteristik visual berbeda. Ketiga model tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.2, dengan keterangan bahwa Gambar 3.2(a) merupakan STL 1, Gambar 3.2(b) merupakan STL 2, dan Gambar 3.2(c) merupakan STL 3.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.2 Variasi Model 3D Objek Ka'bah dalam Format STL: (a) STL 1, (b) STL 2, dan (c) STL 3

Berdasarkan Gambar 3.2, model pada bagian (a) merupakan STL 1, model pada bagian (b) merupakan STL 2, dan model pada bagian (c) merupakan STL 3. STL 1 menampilkan model Ka'bah dengan elemen pendukung berupa alas, area melengkung, serta detail visual pada bagian bangunan. STL 2 menampilkan bangunan utama Ka'bah tanpa elemen alas atau area pendukung di sekitarnya. Sementara itu, STL 3 menampilkan model Ka'bah dengan alas dan area

melengkung, tetapi detail visual pada bangunan lebih sederhana dibandingkan STL

1. Perbedaan karakteristik visual tersebut digunakan untuk melihat pengaruh variasi model terhadap hasil simulasi pencetakan.

Alternatif desain disusun berdasarkan kombinasi antara tiga model STL dan tiga variasi infill density, yaitu 20%, 40%, dan 60%. Dengan demikian, STL 1 menghasilkan alternatif A1, A2, dan A3; STL 2 menghasilkan alternatif A4, A5, dan A6; sedangkan STL 3 menghasilkan alternatif A7, A8, dan A9. Setiap alternatif kemudian dievaluasi berdasarkan empat kriteria, yaitu waktu cetak, penggunaan filamen, biaya pencetakan, dan kekuatan relatif hasil cetak.

Tabel 3.2 Alternatif Desain dan Variasi Infill Density

Kode Alternatif	Model STL	Infill Density (%)
A1	STL 1	20%
A2	STL 1	40%
A3	STL 1	60%
A4	STL 2	20%
A5	STL 2	40%
A6	STL 2	60%
A7	STL 3	20%
A8	STL 3	40%
A9	STL 3	60%

Berdasarkan Tabel 3.2, total alternatif yang digunakan dalam penelitian ini berjumlah sembilan. Setiap alternatif merupakan kombinasi antara model STL dan nilai infill density tertentu. Alternatif-alternatif tersebut selanjutnya digunakan sebagai objek simulasi pencetakan untuk memperoleh nilai kriteria yang dibutuhkan dalam perhitungan metode TOPSIS-PSO.

3.2.2 Kriteria Penilaian

Penelitian ini menggunakan empat kriteria untuk mengevaluasi setiap alternatif desain, yaitu waktu cetak, penggunaan filamen, biaya pencetakan, dan

kekuatan relatif hasil cetak. Keempat kriteria tersebut dipilih karena berkaitan langsung dengan efisiensi dan kelayakan desain model 3D dalam proses pencetakan.

a. Waktu Cetak (C1)

Kriteria ini menunjukkan lama waktu yang dibutuhkan untuk mencetak satu alternatif desain berdasarkan hasil simulasi pada PrusaSlicer. Waktu cetak termasuk kriteria cost, karena nilai yang lebih kecil lebih diinginkan.

b. Penggunaan Filamen (C2)

Kriteria ini menunjukkan jumlah material filamen yang digunakan dalam satu proses pencetakan. Penggunaan filamen juga termasuk kriteria cost, karena semakin sedikit material yang dibutuhkan, semakin efisien proses pencetakan.

c. Biaya Pencetakan (C3)

Kriteria ini menunjukkan total biaya pencetakan yang dihitung dari biaya filamen dan biaya listrik selama proses pencetakan. Kriteria ini termasuk cost, karena alternatif dengan biaya lebih rendah dianggap lebih baik.

d. Kekuatan Relatif Hasil Cetak (C4)

Kriteria ini direpresentasikan melalui nilai *infill density*. Semakin tinggi nilai *infill density*, semakin rapat struktur bagian dalam objek cetak dan semakin tinggi kekuatannya. Secara empiris, peningkatan *infill density* berbanding lurus dengan peningkatan kekuatan mekanik struktural hasil cetak (Cahyati & Putra, 2023). Oleh karena itu, kriteria ini termasuk *benefit*, karena nilai yang lebih besar lebih diinginkan.

3.2.3 Prosedur Pengumpulan Data Simulasi

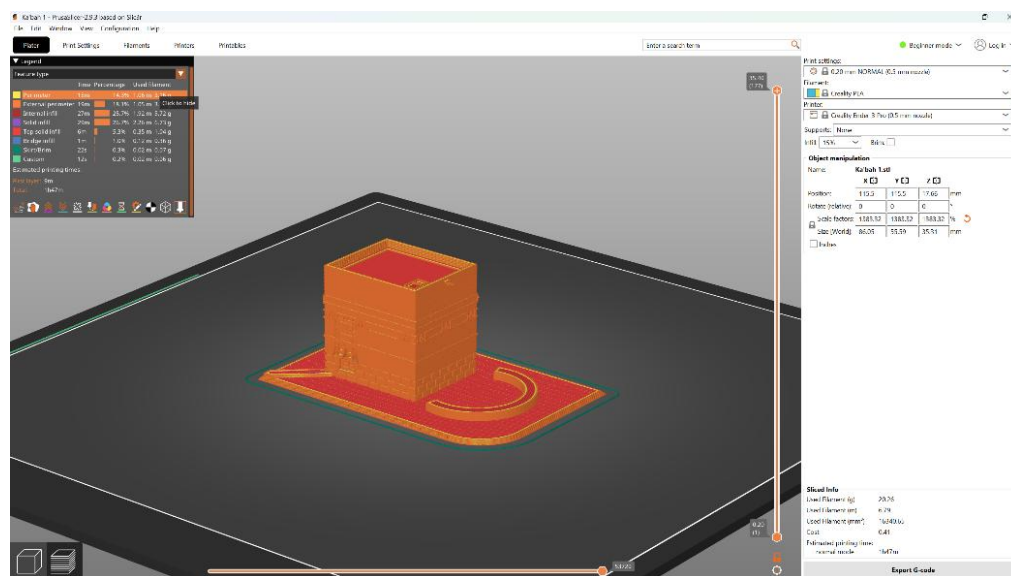
Pengumpulan data simulasi pada penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak PrusaSlicer. Proses simulasi dilakukan terhadap sembilan alternatif desain yang telah disusun dari kombinasi tiga model STL Ka'bah dan tiga variasi infill density. Tujuan dari proses ini adalah untuk memperoleh data kuantitatif berupa waktu cetak, penggunaan filamen, dan estimasi biaya pencetakan pada setiap alternatif. Prosedur pengumpulan data simulasi dilakukan secara sistematis sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Prosedur Pengumpulan Data Simulasi

No	Tahapan	Keterangan
1	Persiapan model STL	Menyiapkan tiga model 3D objek Ka'bah dalam format STL yang akan digunakan sebagai objek simulasi.
2	Import model ke PrusaSlicer	Memasukkan setiap model STL ke dalam perangkat lunak PrusaSlicer.
3	Pengaturan parameter simulasi	Mengatur profil printer, jenis material, dan parameter pencetakan sesuai spesifikasi simulasi yang telah ditentukan.
4	Variasi infill density	Mengatur nilai infill density pada setiap model STL sebesar 20%, 40%, dan 60%.
5	Proses slicing	Melakukan slicing pada setiap kombinasi model STL dan infill density.
6	Pencatatan hasil simulasi	Mencatat hasil slicing berupa waktu cetak dan penggunaan filamen.
7	Perhitungan biaya pencetakan	Menghitung estimasi biaya pencetakan berdasarkan penggunaan filamen dan konsumsi listrik.
8	Penyusunan data	Menyusun seluruh data hasil simulasi ke dalam matriks keputusan.

Berdasarkan Tabel 3.3, proses pengumpulan data dimulai dari persiapan model STL hingga penyusunan matriks keputusan. Dalam proses simulasi, seluruh parameter pencetakan dibuat tetap, kecuali nilai infill density. Hal ini dilakukan agar perbedaan hasil simulasi antar alternatif lebih dipengaruhi oleh perbedaan model STL dan variasi infill density, bukan oleh perubahan parameter pencetakan lainnya.

Hasil dari proses slicing pada PrusaSlicer digunakan untuk memperoleh nilai kriteria waktu cetak dan penggunaan filamen. Nilai biaya pencetakan diperoleh melalui perhitungan berdasarkan penggunaan filamen dan konsumsi listrik, sedangkan nilai kekuatan relatif direpresentasikan oleh nilai infill density yang digunakan pada masing-masing alternatif. Seluruh data tersebut kemudian direkapitulasi sebagai matriks keputusan yang menjadi input dalam perhitungan metode TOPSIS-PSO. Untuk memperjelas proses simulasi yang dilakukan, contoh tampilan simulasi pencetakan model 3D pada perangkat lunak PrusaSlicer dapat ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 3.3 Simulasi Pencetakan Model 3D pada PrusaSlicer

3.2.4 Spesifikasi Simulasi Pencetakan

Simulasi pencetakan pada penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak PrusaSlicer versi 2.9.3 dengan printer Creality Ender 3 Pro sebagai referensi. Material yang digunakan adalah filamen PLA (*Polylactic Acid*). Seluruh alternatif disimulasikan dengan parameter pencetakan yang sama agar data yang dihasilkan

dapat dibandingkan secara konsisten. Perbedaan antaralternatif hanya terletak pada model STL dan nilai *infill density* yang telah ditentukan sebelumnya.

Parameter yang digunakan dalam simulasi meliputi spesifikasi material, pengaturan pencetakan, serta komponen pendukung perhitungan biaya. Rincian parameter tersebut disajikan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Spesifikasi Parameter Simulasi Pencetakan

Parameter	Keterangan
Perangkat Lunak Slicer	PrusaSlicer versi 2.9.3
Printer	Creality Ender 3 Pro
Jenis Filamen	PLA (Polylactic Acid)
Vendor Filamen	Creality
Diameter Filamen	1,75 mm
Densitas Filamen	1,24 g/cm ³
Layer Height	0,2 mm
Nozzle Diameter	0,5 mm
Suhu Nozzle	200°C
Suhu Bed	60°C
Jumlah Perimeter	2
Kecepatan Infill	50 mm/s
Harga Filamen	Rp 150.000/kg
Daya Listrik Printer	150 Watt
Tarif Listrik	Rp 1.444/kWh

Berdasarkan Tabel 3.4, seluruh parameter utama dibuat tetap untuk menjaga keseragaman proses simulasi. Pengaturan ini bertujuan agar perbedaan hasil yang diperoleh berasal dari variasi desain dan *infill density*, bukan dari perubahan parameter pencetakan. Parameter harga filamen, daya printer, dan tarif listrik juga digunakan sebagai dasar dalam perhitungan biaya pencetakan pada subbab berikutnya.

3.2.5 Perhitungan Biaya Pencetakan

Biaya pencetakan pada penelitian ini dihitung berdasarkan dua komponen, yaitu biaya filamen dan biaya listrik. Pendekatan ini digunakan agar nilai biaya

yang diperoleh tidak hanya mencerminkan penggunaan filamen, tetapi juga konsumsi energi selama proses pencetakan. Dalam proses *additive manufacturing*, biaya material dan biaya energi termasuk komponen penting dalam biaya pemrosesan (*processing cost*) (Khanna et al., 2024).

Secara matematis, total biaya pencetakan dirumuskan sebagai berikut:

$$C = C_f + C_l \quad (3.1)$$

dengan:

C adalah total biaya pencetakan,

C_f adalah biaya filamen,

C_l adalah biaya listrik.

Biaya filamen dihitung berdasarkan jumlah filamen yang digunakan selama proses pencetakan dikalikan dengan harga filamen per kilogram. Perhitungan ini mengacu pada konsumsi material aktual sebagai dasar penentuan biaya material (Khanna et al., 2024). Persamaannya adalah:

$$C_f = \frac{W_f}{1000} \times H_f \quad (3.2)$$

di mana:

W_f adalah berat filamen yang digunakan (gram),

H_f adalah harga filamen per kilogram.

Biaya listrik dihitung berdasarkan daya printer, waktu pencetakan, dan tarif listrik. Konsumsi energi pada proses 3D printing umumnya dinyatakan sebagai hasil perkalian antara daya mesin dan waktu operasi (Abdalwahab et al., 2025).

Persamaan biaya listrik yang digunakan adalah:

$$C_l = \frac{P \times t}{1000} \times T_l \quad (3.3)$$

di mana:

P adalah daya listrik mesin pencetak (watt),

t adalah waktu pencetakan (jam),

T_l adalah tarif listrik per kWh.

Berdasarkan persamaan tersebut, biaya listrik dihitung dari daya printer, lama waktu pencetakan, dan tarif listrik per kWh. Dengan menggabungkan biaya filamen dan biaya listrik, total biaya pencetakan untuk setiap alternatif dapat diperoleh secara konsisten dan selanjutnya digunakan sebagai salah satu kriteria dalam matriks keputusan.

3.2.6 Penyusunan Matriks Keputusan

Setelah seluruh data hasil simulasi dan perhitungan biaya diperoleh, data tersebut disusun ke dalam bentuk matriks keputusan. Matriks keputusan digunakan sebagai input utama dalam proses perhitungan metode TOPSIS-PSO. Matriks ini memuat nilai setiap alternatif terhadap seluruh kriteria yang digunakan dalam penelitian.

Alternatif yang digunakan dalam penelitian ini berjumlah sembilan, yaitu A1 sampai A9. Setiap alternatif merupakan kombinasi antara model STL dan nilai infill density tertentu. Adapun kriteria yang digunakan berjumlah empat, yaitu waktu cetak, penggunaan filamen, biaya pencetakan, dan kekuatan relatif hasil cetak. Dengan demikian, matriks keputusan pada penelitian ini terdiri dari sembilan baris alternatif dan empat kolom kriteria. Komponen penyusun matriks keputusan ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Komponen Penyusun Matriks Keputusan

Komponen	Isi Data	Sumber Data	Keterangan
Alternatif	A1 sampai A9	Kombinasi model STL dan infill density	Menunjukkan desain yang akan dievaluasi
C1	Waktu cetak	Hasil slicing PrusaSlicer	Kriteria cost
C2	Penggunaan filamen	Hasil slicing PrusaSlicer	Kriteria cost
C3	Biaya pencetakan	Perhitungan biaya filamen dan listrik	Kriteria cost
C4	Kekuatan relatif hasil cetak	Nilai infill density	Kriteria benefit

Berdasarkan Tabel 3.5, matriks keputusan disusun dari sembilan alternatif desain dan empat kriteria penilaian. Nilai pada kriteria C1 dan C2 diperoleh dari hasil slicing menggunakan PrusaSlicer. Nilai C3 diperoleh dari hasil perhitungan biaya pencetakan berdasarkan penggunaan filamen dan konsumsi listrik. Sementara itu, nilai C4 diperoleh dari nilai infill density yang digunakan sebagai representasi kekuatan relatif hasil cetak.

Dalam proses perhitungan, kriteria C1, C2, dan C3 diperlakukan sebagai kriteria cost karena nilai yang lebih kecil lebih diinginkan. Sebaliknya, kriteria C4 diperlakukan sebagai kriteria benefit karena nilai yang lebih besar menunjukkan kekuatan relatif yang lebih tinggi. Pengelompokan jenis kriteria ini digunakan pada tahap penentuan solusi ideal positif dan solusi ideal negatif dalam metode TOPSIS.

Matriks keputusan yang telah disusun selanjutnya digunakan dalam proses normalisasi, pembobotan, evaluasi fitness pada PSO, dan perankingan alternatif menggunakan TOPSIS. Nilai numerik dari matriks keputusan berdasarkan hasil simulasi pencetakan disajikan pada Bab IV.

3.3 Desain Sistem

Pada penelitian ini, desain sistem disusun untuk menggambarkan alur kerja metode yang digunakan dalam menentukan desain model 3D objek Ka'bah terbaik berdasarkan data simulasi pencetakan. Sistem dirancang dengan mengintegrasikan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan metode *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS). Melalui rancangan ini, data hasil simulasi yang telah disusun dalam bentuk matriks keputusan dapat diolah

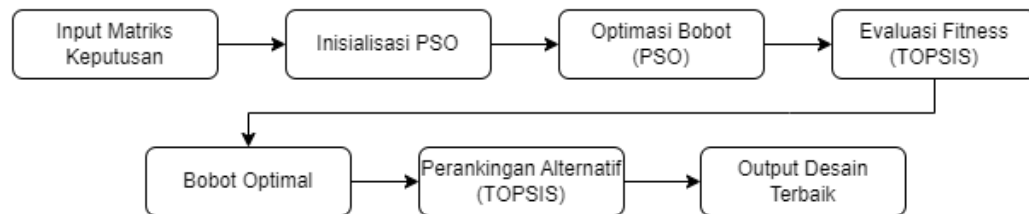
secara sistematis untuk menghasilkan bobot kriteria yang optimal serta peringkat akhir alternatif desain.

Masukan utama pada sistem ini adalah matriks keputusan yang memuat nilai setiap alternatif terhadap empat kriteria, yaitu waktu cetak, penggunaan filamen, biaya pencetakan, dan kekuatan relatif hasil cetak. Matriks keputusan tersebut berasal dari hasil simulasi pencetakan sembilan alternatif desain model 3D Ka'bah yang merupakan kombinasi tiga model STL dengan tiga variasi *infill density*. Data tersebut menjadi dasar dalam seluruh proses pengolahan pada sistem.

Setelah matriks keputusan diterima, sistem menjalankan proses optimasi bobot kriteria menggunakan algoritma PSO. Pada tahap ini, setiap partikel merepresentasikan kandidat bobot untuk seluruh kriteria. Bobot yang dihasilkan kemudian dievaluasi menggunakan metode TOPSIS untuk menghitung nilai preferensi masing-masing alternatif. Nilai preferensi tersebut digunakan sebagai dasar dalam proses optimasi PSO melalui mekanisme pembaruan *personal best* dan *global best*, sehingga diperoleh kombinasi bobot yang semakin baik secara iteratif. Pendekatan ini sejalan dengan tujuan penelitian untuk menghasilkan proses pemilihan desain yang objektif, sistematis, dan berbasis data simulasi.

Setelah proses optimasi selesai, bobot terbaik yang diperoleh digunakan kembali dalam perhitungan TOPSIS untuk menghasilkan nilai preferensi dan peringkat akhir seluruh alternatif desain. Dengan demikian, sistem tidak hanya menentukan bobot kriteria secara otomatis, tetapi juga memberikan rekomendasi desain model 3D Ka'bah yang paling sesuai berdasarkan keseimbangan antar

kriteria yang digunakan. Uraian lebih rinci mengenai tahapan implementasi metode TOPSIS-PSO pada penelitian ini disajikan pada subbab berikutnya.



Gambar 3.4 Diagram Desain Sistem TOPSIS-PSO

Berdasarkan Gambar 3.4, sistem dimulai dari input berupa matriks keputusan hasil simulasi pencetakan. Selanjutnya sistem melakukan inisialisasi PSO dan optimasi bobot kriteria, di mana setiap kandidat bobot dievaluasi menggunakan TOPSIS untuk memperoleh nilai fitness. Setelah diperoleh bobot optimal, sistem menjalankan perankingan alternatif menggunakan TOPSIS dan menghasilkan keluaran berupa desain model 3D terbaik yang direkomendasikan.

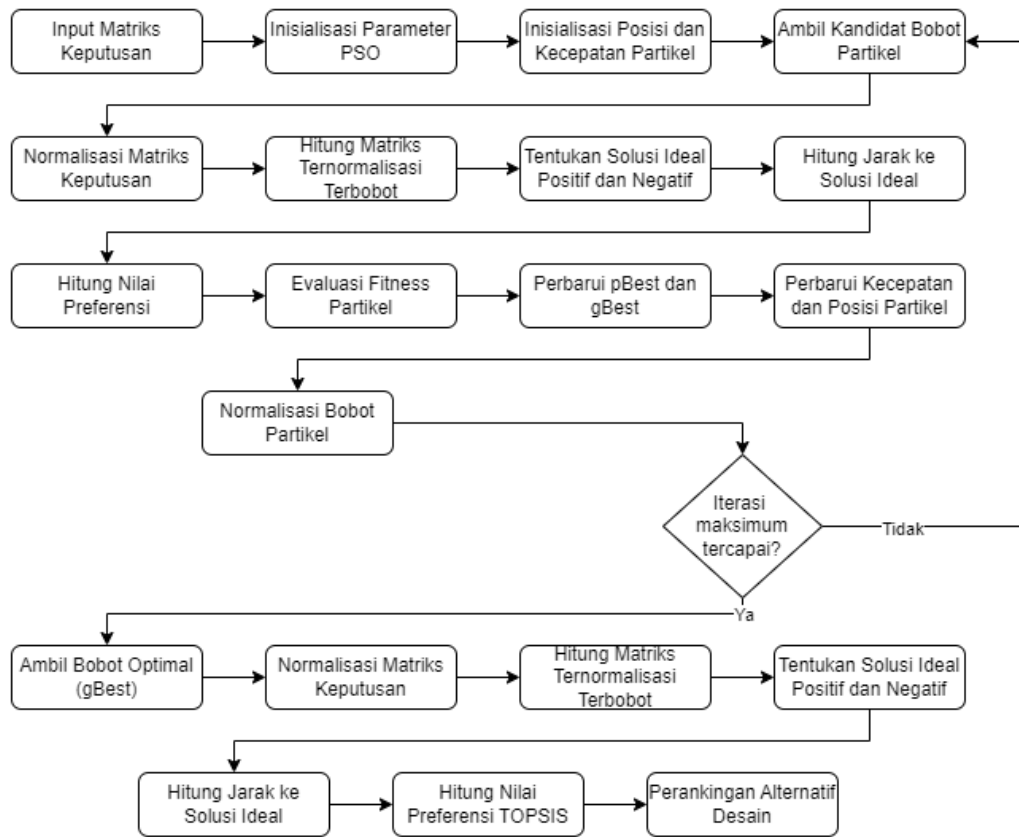
3.4 Implementasi Metode TOPSIS-PSO

Implementasi metode TOPSIS-PSO dalam penelitian ini diarahkan untuk memilih alternatif desain model 3D objek Ka'bah yang paling layak berdasarkan data simulasi pencetakan. Data masukan yang digunakan berupa matriks keputusan berisi sembilan alternatif desain, yaitu kombinasi tiga model STL dengan tiga variasi *infill density*. Setiap alternatif dinilai menggunakan empat kriteria teknis, meliputi waktu cetak, penggunaan filamen, biaya pencetakan, dan kekuatan relatif hasil cetak.

Dalam rancangan tersebut, PSO ditempatkan sebagai mekanisme optimasi bobot kriteria, sedangkan TOPSIS berfungsi sebagai metode evaluasi untuk

menghitung nilai preferensi setiap alternatif. PSO tidak secara langsung menentukan alternatif terbaik, tetapi mencari komposisi bobot yang paling sesuai dengan karakteristik data simulasi. Bobot yang diperoleh dari proses PSO kemudian digunakan pada perhitungan TOPSIS akhir untuk menghasilkan urutan alternatif desain secara kuantitatif.

Secara umum, proses implementasi metode TOPSIS-PSO diawali dengan input matriks keputusan. Selanjutnya, PSO membangkitkan sejumlah partikel, di mana setiap partikel merepresentasikan kandidat bobot kriteria. Setiap kandidat bobot tersebut digunakan dalam perhitungan TOPSIS untuk memperoleh nilai preferensi alternatif. Nilai preferensi kemudian digunakan untuk menghitung nilai fitness partikel. Melalui proses iterasi PSO, bobot kriteria diperbarui hingga diperoleh bobot optimal. Setelah bobot optimal diperoleh, metode TOPSIS dijalankan kembali untuk menghasilkan nilai preferensi dan peringkat akhir seluruh alternatif desain. Alur implementasi metode TOPSIS-PSO pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram Alur Implementasi Metode TOPSIS-PSO

Berdasarkan Gambar 3.5, proses implementasi dimulai dari input matriks keputusan yang berisi nilai sembilan alternatif terhadap empat kriteria. Selanjutnya dilakukan inisialisasi parameter PSO serta inisialisasi posisi dan kecepatan partikel. Setiap partikel merepresentasikan kandidat bobot kriteria yang digunakan dalam proses perhitungan TOPSIS. Kandidat bobot tersebut digunakan untuk membentuk matriks ternormalisasi terbobot, menentukan solusi ideal positif dan negatif, menghitung jarak terhadap solusi ideal, serta menghitung nilai preferensi TOPSIS. Nilai preferensi yang diperoleh kemudian digunakan sebagai dasar evaluasi fitness partikel. Setelah itu, dilakukan pembaruan *pBest*, *gBest*, kecepatan, dan posisi partikel hingga iterasi maksimum tercapai. Setelah proses iterasi selesai, bobot

optimal yang diperoleh dari $gBest$ digunakan kembali dalam perhitungan TOPSIS akhir untuk menghasilkan nilai preferensi dan perankingan alternatif desain.

3.4.1 Representasi Partikel dan Parameter PSO

Pada tahap awal implementasi, setiap partikel dalam PSO dirancang sebagai representasi kandidat bobot untuk empat kriteria evaluasi. Dengan demikian, satu partikel tidak menggambarkan bentuk model 3D, tetapi menggambarkan proporsi kepentingan dari kriteria waktu cetak, penggunaan filamen, biaya pencetakan, dan kekuatan relatif. Representasi ini digunakan agar proses pemilihan desain tidak hanya bergantung pada bobot yang ditentukan secara manual, tetapi diperoleh melalui pencarian solusi berbasis data.

Jumlah kriteria yang digunakan pada penelitian ini adalah empat, yaitu waktu cetak (C1), penggunaan filamen (C2), biaya pencetakan (C3), dan kekuatan relatif hasil cetak (C4). Dengan demikian, setiap partikel direpresentasikan sebagai vektor berdimensi empat yang dinyatakan sebagai berikut:

$$\mathbf{X}_i = [w_{i1}, w_{i2}, w_{i3}, w_{i4}]$$

dengan $w_{i1}, w_{i2}, w_{i3}, w_{i4}$ masing-masing menyatakan bobot untuk kriteria C1, C2, C3, dan C4. Nilai setiap bobot berada pada rentang 0 sampai 1 dan harus memenuhi kendala normalisasi, yaitu jumlah seluruh bobot dalam satu partikel sama dengan 1. Kendala ini diterapkan agar bobot yang dihasilkan bersifat proporsional dan dapat digunakan secara valid dalam perhitungan TOPSIS.

Selain posisi partikel, setiap partikel juga memiliki kecepatan yang digunakan untuk memperbarui posisinya pada setiap iterasi. Kecepatan partikel dinyatakan dalam bentuk vektor dengan dimensi yang sama seperti posisi partikel,

sehingga setiap perubahan posisi merepresentasikan perubahan nilai bobot pada masing-masing kriteria. Melalui mekanisme ini, partikel-partikel bergerak di dalam ruang solusi untuk mencari kombinasi bobot yang menghasilkan kualitas keputusan terbaik.

Parameter PSO yang digunakan pada penelitian ini ditetapkan sebelum proses optimasi dijalankan. Parameter tersebut meliputi jumlah partikel, jumlah iterasi maksimum, faktor inersia, koefisien kognitif, koefisien sosial, dimensi partikel, dan rentang kecepatan awal. Konfigurasi parameter yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Parameter Algoritma PSO

Parameter PSO	Nilai
Jumlah Partikel	5 partikel
Jumlah Iterasi Maksimum	30 iterasi
Faktor Inersia (ω)	0,7
Koefisien Kognitif (c_1)	1,5
Koefisien Sosial (c_2)	1,5
Dimensi Partikel	4
Rentang Kecepatan Awal	$[-0,1 ; 0,1]$

Berdasarkan Tabel 3.6, jumlah partikel ditetapkan sebanyak lima partikel dengan jumlah iterasi maksimum sebanyak tiga puluh iterasi. Pemilihan jumlah partikel yang relatif kecil dilakukan dengan mempertimbangkan ruang solusi penelitian yang sederhana, yaitu empat dimensi bobot kriteria. Penggunaan lima partikel juga sejalan dengan penelitian Rezkianti & Lestari (2026), yang menggunakan lima partikel pada PSO untuk menjaga efisiensi komputasi sekaligus tetap memastikan proses konvergensi selama optimasi. Jumlah iterasi maksimum ditetapkan sebanyak tiga puluh iterasi karena pada penelitian ini nilai fitness telah menunjukkan kecenderungan stabil pada iterasi akhir. Hal ini sejalan dengan

penelitian Liu et al. (2025), yang menunjukkan bahwa nilai global-best fitness mengalami perubahan cepat pada 20 sampai 30 iterasi awal, kemudian diikuti dengan proses stabilisasi secara bertahap.

Faktor inersia ditetapkan sebesar 0,7, sedangkan koefisien kognitif dan sosial masing-masing ditetapkan sebesar 1,5. Pemilihan nilai tersebut mengacu pada Alonso Lara-Vargas et al. (n.d.), yang menggunakan inertia coefficient sebesar 0,7 serta cognitive dan social factors sebesar 1,5 untuk mencapai keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi. Dimensi partikel ditetapkan sebanyak empat karena setiap partikel merepresentasikan empat bobot kriteria, yaitu C1, C2, C3, dan C4. Sementara itu, rentang kecepatan partikel ditetapkan pada interval $[-0,1; 0,1]$ agar perubahan posisi partikel tidak terlalu besar selama proses optimasi. Penggunaan rentang tersebut mengacu pada Afriyani & Fajriyah (2026), yang menerapkan pembatasan kecepatan partikel pada interval $[-0,1; 0,1]$ agar partikel tetap berada dalam rentang solusi yang diinginkan.

Pada tahap inisialisasi, bobot awal setiap partikel dibangkitkan secara acak, kemudian dinormalisasi agar jumlah total bobot dalam setiap partikel bernilai satu. Langkah ini penting untuk memastikan bahwa setiap kandidat solusi telah memenuhi kendala pembobotan sebelum dievaluasi menggunakan metode TOPSIS. Setelah posisi dan kecepatan awal partikel ditentukan, proses selanjutnya adalah melakukan normalisasi matriks keputusan dan pembobotan menggunakan bobot partikel yang telah dibangkitkan. Tahapan tersebut dijelaskan pada subbab berikutnya.

3.4.2 Normalisasi Matriks Keputusan dan Pembobotan

Setelah bobot awal partikel dibangkitkan dan dinormalisasi, tahap selanjutnya dalam implementasi metode TOPSIS-PSO adalah melakukan normalisasi matriks keputusan dan pembobotan. Tahap ini bertujuan untuk mengubah data hasil simulasi pencetakan yang memiliki satuan berbeda-beda menjadi nilai yang dapat dibandingkan secara adil dalam proses evaluasi alternatif. Pada penelitian ini, matriks keputusan memuat nilai sembilan alternatif desain terhadap empat kriteria, yaitu waktu cetak, penggunaan filamen, biaya pencetakan, dan kekuatan relatif hasil cetak. Karena keempat kriteria tersebut memiliki skala yang berbeda, maka diperlukan proses normalisasi sebelum dilakukan perhitungan TOPSIS.

Sesuai dengan implementasi penelitian ini, normalisasi dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama adalah normalisasi *Min-Max* yang digunakan untuk menyeragamkan skala nilai pada setiap kriteria. Langkah ini diperlukan karena data penelitian memiliki satuan yang berbeda, seperti menit untuk waktu cetak, gram untuk filamen, rupiah untuk biaya pencetakan, dan persen untuk *infill density*. Persamaan normalisasi *Min-Max* yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$r'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (3.4)$$

Tahap kedua adalah normalisasi vektor terhadap hasil normalisasi *Min-Max* untuk memenuhi prosedur standar pada metode TOPSIS. Perhitungan normalisasi vektor pada penelitian ini mengacu pada Persamaan (2.2), sedangkan pembentukan matriks ternormalisasi terbobot mengacu pada Persamaan (2.3). Dengan demikian, nilai hasil normalisasi vektor selanjutnya dikalikan dengan bobot kriteria yang

direpresentasikan oleh partikel PSO untuk membentuk matriks ternormalisasi terbobot.

Matriks ternormalisasi terbobot yang dihasilkan pada tahap ini selanjutnya digunakan dalam perhitungan TOPSIS untuk menentukan solusi ideal positif dan solusi ideal negatif, menghitung jarak setiap alternatif terhadap solusi ideal, serta memperoleh nilai preferensi alternatif. Dalam konteks integrasi TOPSIS-PSO, nilai preferensi tersebut belum menjadi hasil akhir, tetapi digunakan terlebih dahulu sebagai dasar dalam evaluasi fitness partikel pada proses optimasi bobot. Oleh karena itu, tahap normalisasi dan pembobotan memiliki peran penting sebagai penghubung antara matriks keputusan hasil simulasi dan proses evaluasi fitness dalam algoritma PSO. Uraian mengenai evaluasi fitness dan mekanisme iterasi PSO dijelaskan pada subbab berikutnya.

3.4.3 Evaluasi Fitness dan Mekanisme Iterasi PSO

Setelah matriks keputusan melalui proses normalisasi dan pembobotan, setiap partikel dievaluasi untuk mengetahui sejauh mana kombinasi bobot yang dihasilkannya mampu membedakan kualitas sembilan alternatif desain. Evaluasi tersebut dilakukan dengan menjalankan perhitungan TOPSIS pada setiap kandidat bobot. Hasil TOPSIS berupa nilai preferensi kemudian digunakan untuk menilai kualitas partikel dalam proses optimasi PSO.

Pada tahap ini, TOPSIS berperan sebagai pengukur kualitas keputusan, sedangkan PSO berperan sebagai pencari kombinasi bobot yang lebih baik dari iterasi ke iterasi. Partikel yang menghasilkan nilai fitness lebih tinggi akan menjadi acuan dalam pembaruan posisi partikel berikutnya.

Evaluasi fitness diawali dengan perhitungan TOPSIS terhadap matriks ternormalisasi terbobot yang dihasilkan oleh setiap partikel. Perhitungan ini mencakup penentuan solusi ideal positif dan solusi ideal negatif, perhitungan jarak setiap alternatif terhadap solusi ideal, serta perhitungan nilai preferensi alternatif. Seluruh tahapan tersebut mengacu pada Persamaan (2.4) sampai Persamaan (2.8). Dari proses tersebut diperoleh seperangkat nilai preferensi untuk seluruh alternatif yang kemudian digunakan sebagai dasar dalam menghitung fitness partikel.

Fungsi fitness dalam penelitian ini disusun dengan mempertimbangkan dua aspek, yaitu kecenderungan umum nilai preferensi dan nilai terendah dari seluruh alternatif. Nilai rata-rata preferensi digunakan untuk melihat kualitas distribusi skor secara keseluruhan, sedangkan nilai minimum digunakan sebagai pengendali agar tidak terdapat alternatif dengan skor yang terlalu rendah akibat komposisi bobot yang kurang seimbang. Dengan pendekatan tersebut, fungsi fitness tidak hanya mendorong munculnya satu alternatif dengan nilai sangat tinggi, tetapi juga menjaga agar hasil perhitungan TOPSIS tetap memiliki sebaran nilai yang rasional. Fungsi fitness yang digunakan dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Fitness} = 0,7 \times \text{mean}(V_i) + 0,3 \times \min(V_i) \quad (3.5)$$

dengan V_i menyatakan nilai preferensi alternatif ke- i . Komponen $\text{mean}(V_i)$ digunakan untuk mendorong agar seluruh alternatif memiliki kualitas skor preferensi yang baik secara rata-rata, sedangkan komponen $\min(V_i)$ digunakan untuk menghindari adanya alternatif yang memiliki skor terlalu rendah. Bobot 0,7 dan 0,3 menunjukkan bahwa penelitian ini lebih memprioritaskan kualitas rata-rata

skor preferensi, namun tetap mempertimbangkan nilai minimum sebagai unsur penyeimbang.

Setelah nilai fitness masing-masing partikel diperoleh, langkah berikutnya adalah menentukan *personal best* (pBest) dan *global best* (gBest). *Personal best* merupakan posisi terbaik yang pernah dicapai oleh setiap partikel berdasarkan nilai fitness tertinggi yang diperolehnya, sedangkan *global best* merupakan posisi terbaik dari seluruh partikel dalam satu populasi. Kedua nilai ini digunakan sebagai acuan utama dalam proses pembaruan kecepatan dan posisi partikel pada iterasi berikutnya.

Pembaruan kecepatan dan posisi partikel pada penelitian ini mengacu pada Persamaan (2.11) dan Persamaan (2.12). Melalui mekanisme tersebut, setiap partikel memperbarui arah geraknya berdasarkan kombinasi antara pengalaman terbaiknya sendiri dan pengalaman terbaik populasi secara keseluruhan. Setelah posisi partikel diperbarui, bobot kriteria pada setiap partikel dinormalisasi kembali agar jumlah total bobot tetap bernilai satu. Langkah normalisasi ulang ini penting untuk memastikan bahwa seluruh kandidat bobot tetap valid dan dapat digunakan dalam perhitungan TOPSIS pada iterasi selanjutnya.

Proses evaluasi fitness, pembaruan *personal best* dan *global best*, serta pembaruan kecepatan dan posisi partikel dilakukan secara berulang hingga kondisi berhenti tercapai, yaitu ketika jumlah iterasi maksimum telah terpenuhi. Melalui proses iteratif ini, PSO secara bertahap mengarahkan partikel menuju kombinasi bobot kriteria yang memberikan kualitas keputusan terbaik berdasarkan data simulasi pencetakan. Bobot terbaik yang diperoleh pada akhir iterasi selanjutnya

digunakan dalam proses perankingan akhir alternatif desain model 3D Ka'bah. Uraian mengenai perankingan akhir alternatif disajikan pada subbab berikutnya.

3.4.4 Perankingan Akhir Alternatif

Setelah proses optimasi PSO mencapai iterasi maksimum, bobot terbaik yang diperoleh dari nilai *global best* digunakan sebagai bobot akhir dalam metode TOPSIS. Pada tahap ini, seluruh alternatif A1 sampai A9 dihitung kembali menggunakan bobot optimal tersebut untuk memperoleh nilai preferensi akhir. Perhitungan ini dilakukan agar hasil perankingan tidak lagi menggunakan bobot awal atau bobot sama rata, melainkan bobot yang telah disesuaikan melalui proses optimasi.

Perankingan akhir dilakukan menggunakan matriks keputusan yang sama seperti pada tahap evaluasi fitness, yaitu matriks keputusan yang memuat nilai setiap alternatif terhadap empat kriteria penelitian. Matriks tersebut terlebih dahulu melalui tahapan normalisasi dan pembobotan sebagaimana telah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Selanjutnya, proses TOPSIS dilanjutkan dengan penentuan solusi ideal positif dan solusi ideal negatif, perhitungan jarak setiap alternatif terhadap kedua solusi ideal tersebut, serta perhitungan nilai preferensi masing-masing alternatif. Tahapan perhitungan ini mengacu pada Persamaan (2.4) sampai Persamaan (2.8).

Nilai preferensi yang diperoleh menunjukkan tingkat kedekatan relatif setiap alternatif terhadap solusi ideal positif dan kejauhannya dari solusi ideal negatif. Semakin besar nilai preferensi suatu alternatif, maka semakin baik alternatif tersebut dalam memenuhi keseluruhan kriteria yang digunakan.

Berdasarkan nilai preferensi tersebut, seluruh alternatif kemudian diurutkan dari nilai tertinggi ke nilai terendah untuk memperoleh peringkat akhir desain model 3D Ka'bah. Alternatif dengan nilai preferensi tertinggi ditetapkan sebagai desain terbaik yang direkomendasikan dalam penelitian ini.

Melalui tahapan ini, integrasi PSO dan TOPSIS tidak hanya menghasilkan bobot kriteria yang diperoleh secara optimasi, tetapi juga menghasilkan keputusan akhir berupa peringkat alternatif desain secara sistematis dan berbasis data simulasi. Hasil numerik dari bobot optimal, nilai preferensi, dan peringkat akhir alternatif disajikan pada Bab IV sebagai bagian dari hasil dan pembahasan penelitian.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Simulasi Pencetakan

Pada subbab ini disajikan data hasil simulasi pencetakan 3D terhadap sembilan alternatif desain model Ka'bah. Sembilan alternatif tersebut merupakan kombinasi antara tiga model STL Ka'bah dan tiga variasi infill density, yaitu 20%, 40%, dan 60%. Setiap alternatif disimulasikan menggunakan perangkat lunak PrusaSlicer untuk memperoleh data kuantitatif yang digunakan sebagai input dalam metode TOPSIS-PSO.

Data yang diperoleh dari proses simulasi meliputi waktu cetak, penggunaan filamen, dan estimasi biaya pencetakan. Selain itu, nilai infill density pada masing-masing alternatif digunakan sebagai representasi kekuatan relatif hasil cetak. Dengan demikian, setiap alternatif memiliki empat nilai kriteria, yaitu waktu cetak (C1), penggunaan filamen (C2), biaya pencetakan (C3), dan kekuatan relatif hasil cetak (C4).

4.1.1 Spesifikasi Simulasi

Untuk menjaga konsistensi data antar alternatif, seluruh proses simulasi dilakukan dengan parameter pencetakan yang sama. Parameter yang dibuat tetap meliputi jenis printer, jenis filamen, layer height, nozzle diameter, suhu nozzle, suhu bed, jumlah perimeter, dan kecepatan infill. Perbedaan antar alternatif hanya terletak pada model STL yang digunakan dan nilai infill density yang divariasikan.

Penggunaan parameter yang sama bertujuan agar perbedaan hasil simulasi lebih dipengaruhi oleh karakteristik model STL dan variasi infill density, bukan oleh perubahan pengaturan pencetakan lainnya. Rincian parameter simulasi yang digunakan telah disajikan pada Tabel 3.4.

Estimasi biaya pencetakan dihitung berdasarkan dua komponen, yaitu biaya filamen dan biaya listrik. Biaya filamen diperoleh dari penggunaan material hasil simulasi, sedangkan biaya listrik dihitung berdasarkan daya printer, waktu pencetakan, dan tarif listrik yang digunakan dalam penelitian.

4.1.2 Data Kriteria Setiap Alternatif

Data hasil simulasi pencetakan untuk seluruh alternatif disajikan pada Tabel 4.1. Tabel tersebut memuat nilai setiap alternatif terhadap empat kriteria yang digunakan dalam penelitian. Kriteria C1, C2, dan C3 merupakan kriteria cost karena nilai yang lebih rendah lebih diinginkan, sedangkan C4 merupakan kriteria benefit karena nilai yang lebih tinggi menunjukkan kekuatan relatif yang lebih baik.

Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi Pencetakan 3D

Alternatif	Model	C1 - Waktu Cetak (menit)	C2 - Filamen (gram)	C3 - Biaya Pencetakan (Rp)	C4 - Infill (%)
A1	STL 1	219,82	52,10	8.608,55	20
A2	STL 1	280,12	70,51	11.587,73	40
A3	STL 1	343,38	89,49	14.663,10	60
A4	STL 2	395,48	110,82	18.050,68	20
A5	STL 2	604,55	180,55	29.264,93	40
A6	STL 2	800,77	247,97	40.086,28	60
A7	STL 3	277,15	69,52	11.428,51	20
A8	STL 3	360,05	95,90	15.684,78	40
A9	STL 3	439,60	122,18	19.913,96	60

Berdasarkan Tabel 4.1, setiap alternatif memiliki nilai kriteria yang berbeda sesuai dengan model STL dan nilai infill density yang digunakan. Pada model STL

yang sama, peningkatan nilai infill density cenderung meningkatkan waktu cetak, penggunaan filamen, dan biaya pencetakan. Hal ini terjadi karena semakin tinggi infill density, semakin banyak material yang digunakan untuk mengisi bagian dalam objek, sehingga waktu dan biaya pencetakan juga meningkat.

Jika dibandingkan berdasarkan model STL, terlihat bahwa model STL 2 menghasilkan waktu cetak, penggunaan filamen, dan biaya pencetakan yang lebih tinggi dibandingkan model STL 1 dan STL 3 pada tingkat infill density yang sama. Kondisi ini menunjukkan bahwa karakteristik model STL dapat memengaruhi efisiensi pencetakan, meskipun objek yang direpresentasikan sama-sama berupa model Ka'bah.

Sementara itu, kriteria kekuatan relatif ditentukan berdasarkan nilai infill density. Alternatif dengan infill density 20% memiliki kekuatan relatif paling rendah, sedangkan alternatif dengan infill density 60% memiliki kekuatan relatif paling tinggi. Oleh karena itu, data pada Tabel 4.1 menunjukkan adanya hubungan trade-off antara efisiensi pencetakan dan kekuatan relatif hasil cetak. Data ini selanjutnya digunakan sebagai matriks keputusan dalam proses perhitungan metode TOPSIS-PSO.

4.2 Implementasi Metode TOPSIS-PSO

Pada subbab ini disajikan proses implementasi metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang diintegrasikan dengan metode *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) untuk menentukan bobot kriteria yang optimal. Proses ini terdiri dari tiga tahap utama, yaitu inisialisasi

parameter PSO, normalisasi matriks keputusan dan evaluasi fitness awal, serta proses iterasi PSO hingga diperoleh bobot optimal.

4.2.1 Inisialisasi Parameter PSO

Sebelum proses optimasi dimulai, dilakukan inisialisasi parameter algoritma PSO yang menentukan perilaku pergerakan partikel selama proses pencarian bobot optimal. Parameter-parameter yang digunakan pada penelitian ini telah disajikan pada Tabel 3.6.

Setiap partikel merepresentasikan satu kandidat vektor bobot dengan dimensi sebesar 4 sesuai jumlah kriteria yang digunakan. Bobot awal setiap partikel dibangkitkan secara acak kemudian dinormalisasi agar jumlah total bobot bernilai 1,0. Kecepatan awal partikel dibangkitkan secara acak dalam rentang $[-0,1; 0,1]$. Hasil inisialisasi bobot dan kecepatan awal masing-masing partikel ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3.

Tabel 4.2 Bobot Awal Setiap Partikel

Partikel	C1	C2	C3	C4	Jumlah
P1	0,1410	0,3580	0,2756	0,2254	1,0000
P2	0,1262	0,1262	0,0470	0,7006	1,0000
P3	0,2614	0,3079	0,0090	0,4218	1,0000
P4	0,5904	0,1506	0,1290	0,1301	1,0000
P5	0,1960	0,3381	0,2783	0,1876	1,0000

Tabel 4.3 Kecepatan Awal Setiap Partikel

Partikel	v1	v2	v3	v4
P1	0,0224	-0,0721	-0,0416	-0,0267
P2	-0,0088	0,0570	-0,0601	0,0028
P3	0,0185	-0,0907	0,0215	-0,0659
P4	-0,0870	0,0898	0,0931	0,0617
P5	-0,0391	-0,0805	0,0368	-0,0120

Dari Tabel 4.2, terlihat bahwa masing-masing partikel memiliki distribusi bobot yang berbeda-beda akibat pembangkitan acak. Keragaman bobot awal ini

penting untuk memastikan PSO dapat mengeksplorasi ruang solusi secara menyeluruh dan tidak terjebak pada solusi lokal sejak awal iterasi.

4.2.2 Proses Normalisasi dan Evaluasi Fitness

Matriks keputusan yang digunakan dalam penelitian ini memiliki satuan data yang berbeda, sehingga nilai antar kriteria tidak dapat langsung dibandingkan. Waktu cetak dinyatakan dalam menit, penggunaan filamen dalam gram, biaya pencetakan dalam rupiah, sedangkan kekuatan relatif dinyatakan melalui persentase *infill density*. Perbedaan satuan tersebut memerlukan proses normalisasi agar seluruh kriteria berada pada skala perhitungan yang sebanding.

Normalisasi dilakukan melalui dua tahap. Tahap pertama menggunakan normalisasi Min-Max untuk mengubah setiap nilai kriteria ke dalam rentang yang seragam. Setelah itu, normalisasi vektor diterapkan untuk menyesuaikan data dengan prosedur TOPSIS. Rumus normalisasi Min-Max yang digunakan adalah Persamaan (3.4). Hasil normalisasi Min-Max untuk seluruh alternatif ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Matriks Ternormalisasi Min-Max

Alt	r1 (C1)	r2 (C2)	r3 (C3)	r4 (C4)
A1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A2	0,1038	0,0940	0,0946	0,5000
A3	0,2127	0,1909	0,1923	1,0000
A4	0,3024	0,2998	0,3000	0,0000
A5	0,6622	0,6558	0,6562	0,5000
A6	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
A7	0,0987	0,0889	0,0896	0,0000
A8	0,2414	0,2236	0,2248	0,5000
A9	0,3783	0,3578	0,3592	1,0000

Selanjutnya, normalisasi vektor diterapkan pada matriks hasil normalisasi Min-Max untuk memenuhi prosedur standar TOPSIS. Normalisasi vektor

dilakukan menggunakan Persamaan (2.2). Hasil normalisasi vektor yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Matriks Ternormalisasi Vektor

Alt	r1 (C1)	r2 (C2)	r3 (C3)	r4 (C4)
A1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A2	0,0774	0,0710	0,0715	0,2582
A3	0,1587	0,1443	0,1452	0,5164
A4	0,2256	0,2265	0,2265	0,0000
A5	0,4940	0,4956	0,4955	0,2582
A6	0,7459	0,7557	0,7550	0,5164
A7	0,0736	0,0672	0,0676	0,0000
A8	0,1801	0,1690	0,1697	0,2582
A9	0,2822	0,2704	0,2712	0,5164

Setelah matriks ternormalisasi diperoleh, setiap partikel dievaluasi menggunakan fungsi *fitness*. Fungsi *fitness* yang digunakan pada penelitian ini merupakan kombinasi antara nilai rata-rata dan nilai minimum dari skor preferensi TOPSIS seluruh alternatif, dengan Persamaan (3.5).

4.2.3 Proses Iterasi dan Bobot Optimal

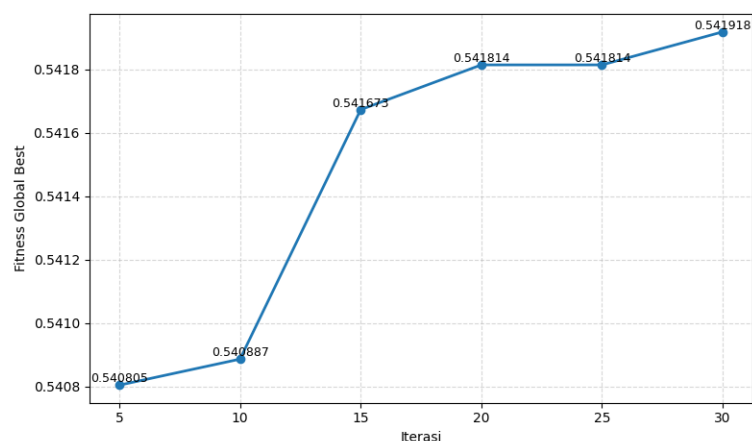
Setelah evaluasi fitness awal dilakukan, proses iterasi PSO dimulai. Pada setiap iterasi, kecepatan dan posisi setiap partikel diperbarui berdasarkan nilai *personal best* (pBest) dan *global best* (gBest) menggunakan Persamaan (2.11) dan (2.12).

Setelah posisi diperbarui, bobot setiap partikel dinormalisasi kembali agar jumlah total bobot tetap bernilai 1,0. Proses iterasi berlangsung sebanyak 30 kali hingga kondisi berhenti tercapai. Perkembangan nilai *fitness global best* selama proses iterasi ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Perkembangan Nilai Global Best PSO

Iterasi	Fitness Global Best
5	0,540805
10	0,540887
15	0,541673
20	0,541814
25	0,541814
30	0,541918

Berdasarkan Tabel 4.6, nilai global best fitness mengalami peningkatan secara bertahap selama proses iterasi PSO. Nilai fitness pada iterasi ke-5 sebesar 0,540805 meningkat menjadi 0,541918 pada iterasi ke-30. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa proses pencarian bobot optimal berjalan secara progresif dan mulai menunjukkan kecenderungan stabil pada iterasi akhir.



Gambar 4.1 Grafik Konvergensi Nilai Global Best PSO

Gambar 4.1 menunjukkan perubahan nilai *global best fitness* selama proses optimasi PSO. Pola grafik memperlihatkan adanya peningkatan fitness dari iterasi awal sampai iterasi akhir, meskipun besar peningkatannya semakin kecil setelah beberapa iterasi terakhir. Nilai fitness bergerak dari 0,540805 pada iterasi ke-5 menjadi 0,541918 pada iterasi ke-30, sehingga terdapat kenaikan sebesar 0,001113. Perubahan yang relatif kecil pada iterasi akhir menunjukkan bahwa partikel telah

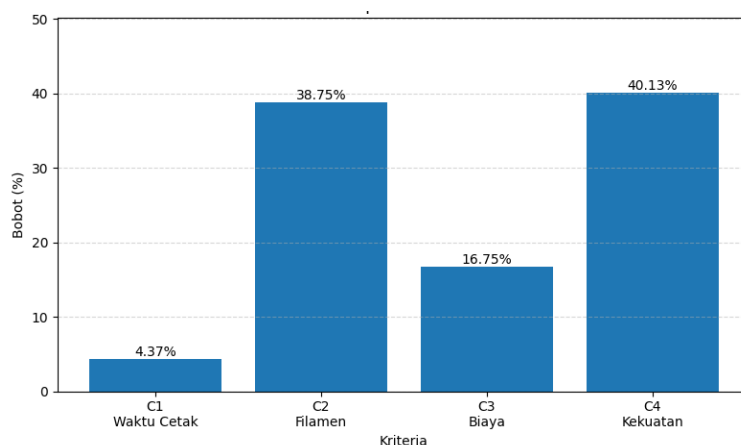
mendekati kombinasi bobot yang stabil. Dengan kata lain, proses pencarian bobot tidak lagi mengalami perubahan besar karena kandidat solusi yang ditemukan sudah cukup konsisten. Hal ini menunjukkan bahwa parameter PSO yang digunakan mampu melakukan pencarian bobot kriteria secara terarah hingga memperoleh bobot optimal.

Setelah proses iterasi selesai, diperoleh bobot kriteria optimal yang direpresentasikan oleh nilai global best pada iterasi terakhir. Bobot optimal hasil optimasi PSO ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Bobot Kriteria Optimal Hasil PSO

Kriteria	Bobot	Bobot (%)
C1 (Waktu Cetak)	0,0437	4,37%
C2 (Filamen)	0,3875	38,75%
C3 (Biaya)	0,1675	16,75%
C4 (Kekuatan)	0,4013	40,13%
Jumlah	1,0000	100%

Berdasarkan Tabel 4.7, bobot optimal hasil PSO menunjukkan bahwa kriteria C4 atau kekuatan memperoleh bobot tertinggi sebesar 0,4013. Kriteria C2 atau penggunaan filamen memperoleh bobot sebesar 0,3875, diikuti oleh C3 atau biaya pencetakan sebesar 0,1675. Sementara itu, C1 atau waktu cetak memperoleh bobot paling rendah sebesar 0,0437. Hasil ini menunjukkan bahwa proses optimasi PSO memberikan prioritas lebih besar pada kekuatan relatif dan penggunaan filamen dibandingkan waktu cetak.



Gambar 4.2 Grafik Bobot Optimal Kriteria Hasil PSO

Gambar 4.2 memperlihatkan perbandingan bobot optimal setiap kriteria yang dihasilkan oleh PSO. Grafik tersebut menunjukkan bahwa kriteria C4 dan C2 memiliki pengaruh paling dominan dalam proses pemilihan alternatif desain. Dominasi bobot C4 menunjukkan bahwa kekuatan relatif menjadi aspek utama dalam penentuan desain terbaik, sedangkan bobot C2 menunjukkan bahwa penggunaan filamen juga berperan penting dalam evaluasi efisiensi sumber daya. Sebaliknya, bobot C1 yang paling rendah menunjukkan bahwa waktu cetak memiliki pengaruh yang lebih kecil dibandingkan kriteria lainnya dalam hasil optimasi.

4.3 Hasil Perankingan Alternatif

Hasil perankingan alternatif diperoleh dengan menerapkan TOPSIS menggunakan bobot optimal yang dihasilkan oleh PSO. Bobot tersebut terdiri dari 0,0437 untuk waktu cetak, 0,3875 untuk penggunaan filamen, 0,1675 untuk biaya pencetakan, dan 0,4013 untuk kekuatan relatif. Komposisi bobot ini menunjukkan bahwa proses evaluasi akhir lebih menekankan keseimbangan antara kekuatan hasil

cetak dan efisiensi penggunaan material. Dengan bobot tersebut, sembilan alternatif desain dihitung kembali melalui tahapan TOPSIS, mulai dari pembentukan matriks ternormalisasi terbobot, penentuan solusi ideal positif dan negatif, perhitungan jarak terhadap solusi ideal, hingga penentuan nilai preferensi.

4.3.1 Perhitungan TOPSIS dengan Bobot Optimal

Tahap pertama adalah pembentukan matriks ternormalisasi terbobot dengan mengalikan matriks ternormalisasi vektor (Tabel 4.5) dengan bobot optimal hasil PSO (Tabel 4.7). Hasil perkalian ini menghasilkan matriks terbobot yang ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Matriks Ternormalisasi Terbobot

Alt	$y_1 (C_1)$	$y_2 (C_2)$	$y_3 (C_3)$	$y_4 (C_4)$
A1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A2	0,0034	0,0275	0,0120	0,1036
A3	0,0069	0,0559	0,0243	0,2072
A4	0,0099	0,0878	0,0379	0,0000
A5	0,0216	0,1920	0,0830	0,1036
A6	0,0326	0,2928	0,1265	0,2072
A7	0,0032	0,0260	0,0113	0,0000
A8	0,0079	0,0655	0,0284	0,1036
A9	0,0123	0,1048	0,0454	0,2072

Berdasarkan matriks terbobot pada Tabel 4.8, selanjutnya ditentukan solusi ideal positif (A^+) dan solusi ideal negatif (A^-). Untuk kriteria biaya (C_1, C_2, C_3), nilai terkecil pada masing-masing kolom menjadi solusi ideal positif karena semakin kecil nilainya semakin baik. Sebaliknya untuk kriteria keuntungan (C_4), nilai terbesar menjadi solusi ideal positif. Solusi ideal yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Solusi Ideal Positif dan Negatif

Solusi Ideal	C_1	C_2	C_3	C_4
A^+ (Positif)	0,0000	0,0000	0,0000	0,2072
A^- (Negatif)	0,0326	0,2928	0,1265	0,0000

Setelah solusi ideal diperoleh, jarak setiap alternatif terhadap solusi ideal positif (D^+_i) dan solusi ideal negatif (D^-_i) dihitung menggunakan jarak Euclidean sebagaimana Persamaan (2.6) dan (2.7).

4.3.2 Nilai Preferensi dan Peringkat Akhir

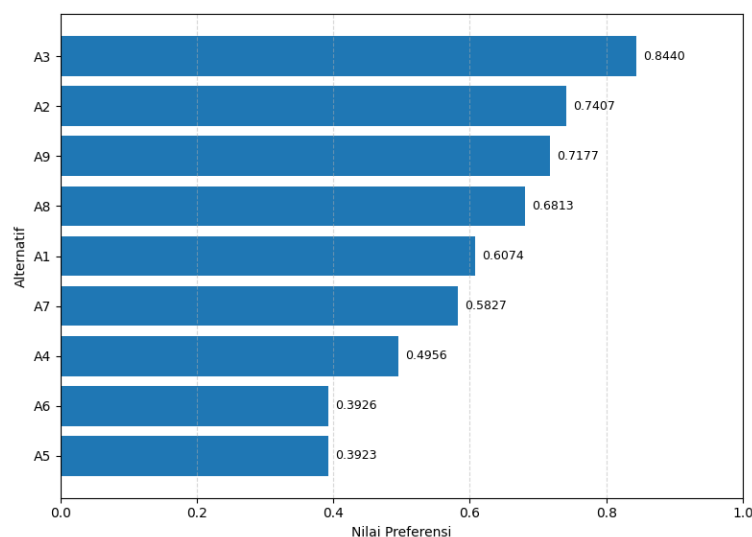
Nilai preferensi setiap alternatif (V_i) dihitung berdasarkan perbandingan jarak terhadap solusi ideal negatif dengan total jarak keduanya, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.8). Hasil perhitungan jarak dan nilai preferensi seluruh alternatif beserta peringkatnya ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Nilai Preferensi dan Peringkat Akhir Alternatif

Alt	Model	Infill (%)	D^+	D^-	Nilai Preferensi (V_i)	Rank
A3	STL 1	60	0,0614	0,3319	0,8440	1
A2	STL 1	40	0,1079	0,3084	0,7407	2
A9	STL 3	60	0,1149	0,2920	0,7177	3
A8	STL 3	40	0,1261	0,2695	0,6813	4
A1	STL 1	20	0,2072	0,3206	0,6074	5
A7	STL 3	20	0,2092	0,2921	0,5827	6
A4	STL 2	20	0,2284	0,2245	0,4956	7
A6	STL 2	60	0,3206	0,2072	0,3926	8
A5	STL 2	40	0,2345	0,1514	0,3923	9

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.10, alternatif A3 memperoleh nilai preferensi tertinggi sebesar 0,8440 dan menempati peringkat pertama. Alternatif ini merupakan model STL 1 dengan *infill density* 60%, sehingga memiliki kekuatan relatif yang tinggi. Keunggulan A3 tidak hanya berasal dari nilai *infill* yang besar, tetapi juga dari efisiensi model STL 1 yang mampu menjaga waktu cetak, penggunaan filamen, dan biaya pencetakan tetap lebih rendah dibandingkan alternatif lain dengan *infill density* yang sama.

Alternatif A2 menempati peringkat kedua dengan nilai preferensi 0,7407, sedangkan A9 berada pada peringkat ketiga dengan nilai 0,7177. Sebaliknya, A5 memperoleh nilai preferensi terendah sebesar 0,3923. Rendahnya nilai A5 berkaitan dengan karakteristik STL 2 yang membutuhkan waktu cetak, filamen, dan biaya lebih besar, tetapi tidak memberikan peningkatan kekuatan relatif yang cukup untuk mengimbangi kenaikan pada kriteria cost. Hasil ini menunjukkan bahwa alternatif A3 merupakan desain model 3D objek Ka'bah yang paling optimal berdasarkan kombinasi kriteria waktu cetak, penggunaan filamen, biaya pencetakan, dan kekuatan relatif.



Gambar 4.3 Grafik Nilai Preferensi Akhir Alternatif

Gambar 4.3 memperlihatkan perbandingan nilai preferensi seluruh alternatif secara visual. Grafik menunjukkan bahwa alternatif A3 memiliki nilai preferensi paling tinggi dibandingkan alternatif lainnya, sehingga menjadi desain terbaik dalam penelitian ini. Selain itu, grafik juga menunjukkan bahwa alternatif A2 dan A9 memiliki nilai preferensi yang relatif tinggi, sedangkan alternatif A4, A5, dan A6 cenderung memiliki nilai preferensi yang lebih rendah. Pola ini memperlihatkan

bahwa alternatif dengan kombinasi desain yang lebih efisien dan memiliki kekuatan relatif yang baik cenderung memperoleh peringkat yang lebih tinggi.

4.3.3 Desain Terbaik yang Direkomendasikan

Berdasarkan Tabel 4.10, alternatif A3 yang merupakan model STL 1 dengan infill density 60% memperoleh nilai preferensi tertinggi sebesar 0,8440 sehingga menempati peringkat pertama dan ditetapkan sebagai desain model 3D Ka'bah terbaik. Alternatif ini memiliki jarak terpendek terhadap solusi ideal positif ($D^+ = 0,0614$) sekaligus jarak terjauh dari solusi ideal negatif ($D^- = 0,3319$) dibandingkan seluruh alternatif lainnya.

Peringkat kedua ditempati oleh alternatif A2 (STL 1, infill 40%) dengan nilai preferensi 0,7407, diikuti oleh A9 (STL 3, infill 60%) di peringkat ketiga dengan nilai preferensi 0,7177. Pola ini menunjukkan bahwa model STL 1 secara umum menghasilkan performa yang lebih baik dibandingkan model STL 2 dan STL 3 pada tingkat infill yang sama, yang mengindikasikan keunggulan efisiensi geometris model STL 1.

Alternatif dengan peringkat terendah adalah A5 (STL 2, infill 40%) dengan nilai preferensi 0,3923. Rendahnya peringkat seluruh alternatif berbasis model STL 2 (A4, A5, A6) disebabkan oleh nilai waktu cetak, konsumsi filamen, dan biaya yang jauh lebih tinggi dibandingkan model STL 1 dan STL 3 pada level infill yang sama, sehingga jarak ke solusi ideal positif menjadi besar.

Dengan demikian, metode PSO-TOPSIS berhasil menghasilkan perankingan yang sistematis dan berbasis data. Alternatif A3 direkomendasikan

sebagai desain model 3D Ka'bah yang paling optimal untuk dicetak berdasarkan keseimbangan antara kekuatan hasil cetak dan efisiensi sumber daya.

4.4 Pembahasan

Pembahasan pada subbab ini difokuskan pada interpretasi hasil penerapan metode TOPSIS-PSO dalam pemilihan desain model 3D objek Ka'bah. Perlu ditegaskan bahwa optimasi dalam penelitian ini tidak dilakukan terhadap bentuk geometri model 3D secara langsung, melainkan terhadap proses pengambilan keputusan dalam memilih alternatif desain terbaik. Model STL yang digunakan pada penelitian ini sudah ditetapkan sejak awal sebagai alternatif desain, sedangkan proses optimasi dilakukan pada bobot kriteria yang digunakan dalam metode TOPSIS.

Dalam penelitian ini, PSO berperan untuk mencari kombinasi bobot kriteria yang optimal berdasarkan data simulasi pencetakan. Bobot tersebut kemudian digunakan dalam metode TOPSIS untuk menghitung nilai preferensi dan menentukan peringkat alternatif. Dengan demikian, hasil optimasi yang diperoleh berupa bobot kriteria optimal dan rekomendasi alternatif desain terbaik, bukan perubahan atau modifikasi bentuk model 3D.

Berdasarkan proses tersebut, alternatif terbaik yang dihasilkan merupakan model yang memiliki keseimbangan paling baik antara waktu cetak, penggunaan filamen, biaya pencetakan, dan kekuatan relatif hasil cetak. Oleh karena itu, pembahasan hasil penelitian mencakup analisis bobot kriteria, hasil perankingan alternatif, perbandingan TOPSIS dengan bobot equal dan TOPSIS-PSO, serta trade-off antar kriteria.

4.4.1 Analisis Bobot dan Hasil Perankingan

Bobot kriteria yang dihasilkan oleh algoritma PSO mencerminkan tingkat kepentingan relatif masing-masing kriteria berdasarkan karakteristik data simulasi. Berdasarkan Tabel 4.7, kriteria kekuatan (C_4) memperoleh bobot tertinggi sebesar 40,13%, diikuti oleh penggunaan filamen (C_2) sebesar 38,75%. Sementara itu, biaya pencetakan (C_3) memperoleh bobot 16,75%, dan waktu cetak (C_1) hanya 4,37%.

Tingginya bobot C_4 menunjukkan bahwa PSO menilai kekuatan hasil cetak sebagai faktor yang paling berpengaruh dalam membedakan kualitas antar alternatif. Hal ini sejalan dengan tujuan penggunaan model Ka'bah sebagai alat peraga edukatif yang memerlukan ketahanan fisik memadai agar dapat digunakan berulang kali. Bobot C_2 yang hampir setara dengan C_4 mengindikasikan bahwa efisiensi penggunaan material juga menjadi pertimbangan penting, terutama dalam konteks keterbatasan sumber daya institusi pendidikan.

Sebaliknya, bobot C_1 yang sangat rendah (4,37%) menunjukkan bahwa perbedaan waktu cetak antar alternatif memiliki pengaruh yang relatif kecil dalam membedakan kualitas keputusan. Kondisi ini dapat dipahami karena dalam konteks produksi alat peraga yang tidak bersifat massal, selisih waktu cetak dalam satuan jam tidak menjadi faktor yang terlalu kritis dibandingkan kekuatan dan efisiensi material.

Dari sisi hasil perankingan, alternatif A3 (STL 1, *infill* 60%) terpilih sebagai desain terbaik dengan nilai preferensi 0,8440. Hasil ini konsisten dengan bobot tinggi pada C_4 , di mana A3 memiliki *infill density* 60% yang berarti kekuatan relatif paling tinggi dalam kelompok model STL 1. Pada saat yang sama, A3 juga memiliki

nilai waktu, filamen, dan biaya yang lebih efisien dibandingkan alternatif infill 60% lainnya (A6 dan A9), sehingga mendapatkan nilai preferensi tertinggi secara keseluruhan.

4.4.2 Perbandingan TOPSIS Bobot Equal vs TOPSIS-PSO

Perbandingan antara TOPSIS dengan bobot equal dan TOPSIS-PSO dilakukan untuk mengetahui pengaruh optimasi bobot kriteria terhadap hasil perankingan alternatif. Pada pendekatan TOPSIS bobot equal, seluruh kriteria dianggap memiliki tingkat kepentingan yang sama. Karena terdapat empat kriteria yang digunakan dalam penelitian ini, maka masing-masing kriteria diberikan bobot sebesar 25%.

Berbeda dengan pendekatan bobot equal, pada TOPSIS-PSO bobot kriteria tidak ditentukan secara sama rata, melainkan diperoleh melalui proses optimasi menggunakan algoritma PSO. Setiap partikel dalam PSO merepresentasikan kandidat bobot kriteria, kemudian dievaluasi menggunakan metode TOPSIS berdasarkan nilai preferensi alternatif. Melalui proses iterasi, PSO menghasilkan kombinasi bobot yang dinilai paling sesuai dengan karakteristik data simulasi pencetakan. Perbandingan distribusi bobot antara TOPSIS bobot equal dan TOPSIS-PSO ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Perbandingan Distribusi Bobot Equal dan Bobot PSO

Kriteria	Bobot Equal (%)	Bobot PSO (%)	Selisih (%)
C ₁ (Waktu Cetak)	25,00	4,37	-20,63
C ₂ (Filamen)	25,00	38,75	+13,75
C ₃ (Biaya)	25,00	16,75	-8,25
C ₄ (Kekuatan)	25,00	40,13	+15,13

Berdasarkan Tabel 4.11, terlihat bahwa penggunaan PSO menghasilkan distribusi bobot yang berbeda dari bobot equal. Pada bobot equal, setiap kriteria memiliki bobot yang sama, yaitu 25%. Sementara itu, hasil optimasi PSO menunjukkan bahwa kriteria kekuatan relatif memperoleh bobot tertinggi, diikuti oleh penggunaan filamen, biaya pencetakan, dan waktu cetak. Hal ini menunjukkan bahwa PSO memberikan bobot secara adaptif berdasarkan karakteristik data, bukan berdasarkan asumsi bahwa semua kriteria memiliki pengaruh yang sama. Hasil perbandingan peringkat alternatif antara TOPSIS bobot equal dan TOPSIS-PSO ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Perbandingan Peringkat TOPSIS Equal vs TOPSIS-PSO

Alt	Model	Infill (%)	Vi Equal	Rank Equal	Vi PSO	Rank PSO	Δ Rank
A1	STL 1	20	0,7162	4	0,6074	5	-1
A2	STL 1	40	0,8071	2	0,7407	2	0
A3	STL 1	60	0,8181	1	0,8440	1	0
A4	STL 2	20	0,5843	7	0,4956	7	0
A5	STL 2	40	0,3651	8	0,3923	9	-1
A6	STL 2	60	0,2838	9	0,3926	8	+1
A7	STL 3	20	0,6904	5	0,5827	6	-1
A8	STL 3	40	0,7237	3	0,6813	4	-1
A9	STL 3	60	0,6722	6	0,7177	3	+3

Berdasarkan Tabel 4.12, alternatif A3 tetap menempati peringkat pertama pada kedua pendekatan. Hal ini menunjukkan bahwa A3 merupakan alternatif yang konsisten sebagai desain terbaik, baik ketika menggunakan bobot equal maupun bobot hasil optimasi PSO. A3 memiliki nilai infill density tertinggi pada model STL 1, tetapi tetap memiliki waktu cetak, penggunaan filamen, dan biaya yang lebih efisien dibandingkan alternatif lain dengan infill density 60%.

Perbedaan peringkat mulai terlihat pada beberapa alternatif lain. Salah satu perubahan yang paling menonjol terjadi pada alternatif A9, yang mengalami

kenaikan peringkat pada TOPSIS-PSO dibandingkan TOPSIS bobot equal. Hal ini terjadi karena A9 memiliki nilai infill density tinggi, tetapi penggunaan filamen dan biaya pencetakannya masih lebih efisien dibandingkan alternatif STL 2 pada infill density yang sama. Ketika PSO memberikan bobot lebih besar pada kekuatan relatif dan penggunaan filamen, posisi A9 menjadi lebih baik dalam hasil perankingan.

Dengan demikian, perbandingan ini menunjukkan bahwa penggunaan PSO mampu menghasilkan bobot kriteria yang lebih adaptif terhadap data simulasi pencetakan. TOPSIS bobot equal berguna sebagai pembanding awal, sedangkan TOPSIS-PSO memberikan hasil perankingan yang lebih mempertimbangkan karakteristik data pada setiap kriteria.

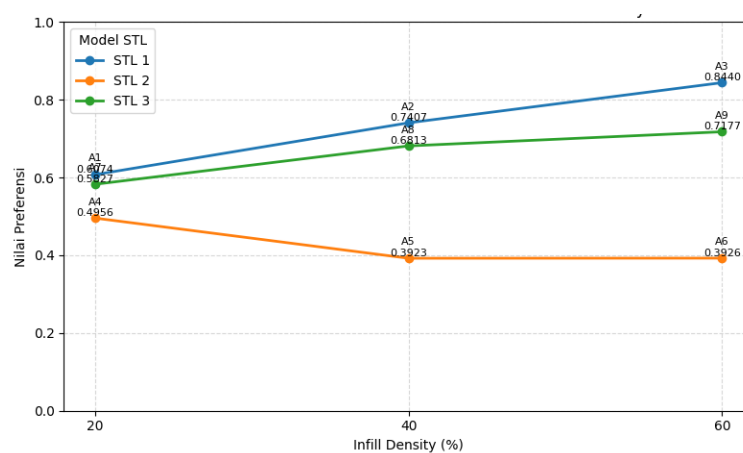
4.4.3 Analisis Trade-off Antar Kriteria

Data simulasi menunjukkan adanya *trade-off* yang jelas antara kriteria efisiensi (waktu, filamen, biaya) dan kriteria kekuatan. Tabel 4.13 menyajikan seluruh data kriteria beserta nilai preferensi untuk memudahkan analisis perbandingan.

Tabel 4.13 Perbandingan Data Kriteria dan Nilai Preferensi Seluruh Alternatif

Alt	Model	Infill (%)	Waktu (menit)	Filamen (gram)	Biaya (Rp)	Nilai Preferensi (V_i)
A1	STL 1	20	219,82	52,10	8.609	0,6074
A2	STL 1	40	280,12	70,51	11.588	0,7407
A3	STL 1	60	343,38	89,49	14.663	0,8440
A4	STL 2	20	395,48	110,82	18.051	0,4956
A5	STL 2	40	604,55	180,55	29.265	0,3923
A6	STL 2	60	800,77	247,97	40.086	0,3926
A7	STL 3	20	277,15	69,52	11.429	0,5827
A8	STL 3	40	360,05	95,90	15.685	0,6813
A9	STL 3	60	439,60	122,18	19.914	0,7177

Berdasarkan Tabel 4.13, setiap model STL menunjukkan perubahan nilai preferensi yang berbeda ketika nilai infill density ditingkatkan. Pada model STL 1, nilai preferensi meningkat dari A1 hingga A3. Pola serupa juga terjadi pada model STL 3, yaitu dari A7 hingga A9. Namun, pada model STL 2, peningkatan infill density tidak memberikan peningkatan nilai preferensi yang signifikan karena alternatif berbasis STL 2 memiliki waktu cetak, penggunaan filamen, dan biaya pencetakan yang relatif lebih tinggi dibandingkan model lainnya.



Gambar 4.4 Grafik Perubahan Nilai Preferensi Berdasarkan Infill Density

Gambar 4.4 memperlihatkan perubahan nilai preferensi berdasarkan variasi infill density pada masing-masing model STL. Grafik menunjukkan bahwa STL 1 memiliki nilai preferensi paling tinggi pada setiap tingkat infill density, dengan nilai tertinggi terdapat pada A3, yaitu STL 1 dengan infill density 60%. STL 3 juga menunjukkan peningkatan nilai preferensi ketika infill density bertambah, meskipun nilainya masih berada di bawah STL 1. Sementara itu, STL 2 memiliki nilai preferensi yang lebih rendah meskipun infill density meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kekuatan relatif melalui infill density perlu tetap

mempertimbangkan kenaikan waktu cetak, penggunaan filamen, dan biaya pencetakan.

Kedua, *trade-off* antara model STL yang berbeda pada *infill* yang sama. Model STL 2 secara konsisten memiliki waktu cetak, konsumsi filamen, dan biaya yang jauh lebih tinggi dibandingkan STL 1 dan STL 3 pada setiap level *infill*. Pada *infill* 20%, A4 (STL 2) membutuhkan waktu 80% lebih lama dan biaya 110% lebih mahal dibandingkan A1 (STL 1). Selisih ini semakin besar pada *infill* 60%, di mana A6 (STL 2) membutuhkan waktu 133% lebih lama dan biaya 173% lebih mahal dibandingkan A3 (STL 1). Karena kekuatan yang diperoleh setara (*infill density* sama), perbedaan besar pada kriteria cost menjadikan seluruh alternatif STL 2 berada di peringkat bawah.

Temuan ini mengindikasikan bahwa perbedaan kompleksitas geometris antar model STL berpengaruh signifikan terhadap efisiensi pencetakan. Model STL 1 terbukti memiliki desain yang paling efisien secara keseluruhan, sehingga menjadi basis terbaik untuk produksi alat peraga manasik berbasis 3D printing.

4.4.4 Keterbatasan Penelitian

Meskipun metode PSO-TOPSIS berhasil menghasilkan perankingan yang sistematis, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil penelitian ini.

Pertama, data yang digunakan seluruhnya berasal dari simulasi perangkat lunak slicer dan bukan dari pencetakan fisik yang sesungguhnya. Nilai waktu, konsumsi filamen, dan estimasi biaya yang dihasilkan PrusaSlicer merupakan

perkiraan yang dapat berbeda dengan kondisi aktual pencetakan, terutama pada faktor-faktor seperti kegagalan cetak, kalibrasi mesin, dan kondisi lingkungan.

Kedua, kekuatan hasil cetak dalam penelitian ini hanya direpresentasikan melalui nilai *infill density* sebagai indikator *proxy*, tanpa pengujian mekanik langsung seperti uji tarik atau uji tekan. Hubungan antara *infill density* dan kekuatan aktual bersifat empiris dan dapat dipengaruhi oleh faktor lain seperti pola *infill*, orientasi cetak, dan kondisi filamen.

Ketiga, penelitian ini dibatasi pada empat kriteria evaluasi dan tidak mempertimbangkan aspek kualitas lainnya seperti akurasi dimensi, kualitas permukaan, dan estetika visual. Penambahan kriteria tersebut berpotensi mengubah hasil perankingan yang diperoleh.

Keempat, parameter PSO yang digunakan (jumlah partikel, iterasi, faktor inersia, dan koefisien kognitif-sosial) dipilih berdasarkan referensi pustaka dan belum melalui proses *tuning* yang sistematis. Konfigurasi parameter yang berbeda dapat menghasilkan bobot optimal yang berbeda pula.

4.5 Integrasi Sains dan Islam

Islam memandang ilmu pengetahuan dan teknologi bukan sebagai sesuatu yang terpisah dari nilai-nilai agama, melainkan sebagai sarana untuk memperkuat keimanan dan memberikan manfaat bagi sesama. Penelitian ini, yang mengintegrasikan metode komputasional PSO-TOPSIS dalam pemilihan desain model 3D Ka'bah, dapat dilihat dari dua dimensi relasi utama dalam ajaran Islam, yaitu hubungan manusia dengan Allah ﷻ (Mu'amalah Ma'allah) dan hubungan manusia dengan sesama manusia (Mu'amalah Ma'annas).

4.5.1 Mu'amalah Ma'allah

Mu'amalah Ma'allah mencakup segala bentuk hubungan dan tanggung jawab manusia kepada Allah ﷻ, termasuk di dalamnya niat dalam beramal, rasa syukur atas karunia akal dan ilmu, serta kesadaran bahwa segala sesuatu yang diciptakan Allah mengandung manfaat bagi manusia. Dalam konteks penelitian ini, dimensi Mu'amalah Ma'allah tercermin melalui beberapa hal berikut.

Pertama, penggunaan teknologi 3D printing dan metode komputasional dalam penelitian ini merupakan bentuk pemanfaatan karunia akal dan ilmu yang dianugerahkan Allah kepada manusia. Allah ﷻ berfirman dalam Q.S. Al-Hadid [57]: 25:

لَقَدْ أَرْسَلْنَا رُسُلَنَا بِالْبَيِّنَاتِ وَأَنْزَلْنَا مَعَهُمُ الْكِتَابَ وَالْمِيزَانَ لِيَقُومَ النَّاسُ بِالْقِسْطِ وَأَنْزَلْنَا الْحَدِيدَ فِيهِ بَأْسٌ شَدِيدٌ وَمَنْفَعٌ لِلنَّاسِ ﴿٢٥﴾

“Sesungguhnya Kami telah mengutus rasul-rasul Kami dengan membawa bukti-bukti yang nyata dan telah Kami turunkan bersama mereka Al-Kitab dan neraca (keadilan) supaya manusia dapat melaksanakan keadilan. Dan Kami ciptakan besi yang padanya terdapat kekuatan yang hebat dan berbagai manfaat bagi manusia” (Q.S. Al-Hadid [57]: 25)

Ayat ini secara tegas menyatakan bahwa Allah menciptakan materi dan material di bumi dengan berbagai manfaat bagi manusia. Teknologi manufaktur aditif (3D printing) merupakan salah satu wujud nyata dari pemanfaatan material tersebut secara ilmiah dan terencana. Penelitian ini mengoptimalkan pemilihan desain sebelum pencetakan dilakukan, sehingga penggunaan material filamen dan energi listrik dapat diminimalkan. Sikap tidak boros dalam menggunakan sumber daya merupakan bentuk syukur atas nikmat yang Allah berikan, sekaligus

perwujudan amanah atas kepercayaan-Nya kepada manusia sebagai khalifah di bumi.

Kedua, penggunaan Ka'bah sebagai objek model 3D dalam penelitian ini mengandung nilai ta'zhim atau pengagungan terhadap syiar Islam. Meskipun penelitian ini bersifat teknis, pemilihan Ka'bah sebagai objek studi mencerminkan kesadaran peneliti akan nilai sakral yang melekat pada bangunan tersebut. Upaya menghadirkan representasi Ka'bah yang akurat dan berkualitas sebagai alat peraga pendidikan merupakan kontribusi nyata dalam memperkuat pemahaman ibadah umat Islam, yang pada hakikatnya adalah bentuk pengabdian kepada Allah ﷻ.

Ketiga, proses optimasi yang dijalankan dalam penelitian ini mencerminkan kepatuhan pada prinsip 'tidak berlebih-lebihan' yang diperintahkan dalam Islam. Allah ﷻ juga menegaskan bahwa Dia tidak akan membebani hamba-Nya melebihi kemampuannya, sebagaimana tercantum dalam Q.S. Al-Baqarah [2]: 286:

لَا يُكَلِّفُ اللَّهُ نَفْسًا إِلَّا وُسْعَهَا ﴿٢٨٦﴾

*“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”
(Q.S. Al-Baqarah [2]: 286)*

Prinsip ini sejalan dengan filosofi penelitian yang mengupayakan solusi terbaik dalam batas kemampuan sumber daya yang ada, bukan memaksakan standar yang tidak terjangkau oleh institusi pendidikan. Sistem PSO-TOPSIS yang dikembangkan membantu pengguna menemukan desain yang paling sesuai dengan kondisi dan keterbatasan yang mereka miliki, mencerminkan nilai tawazun atau keseimbangan dalam Islam.

4.5.2 Mu'amalah Ma'annas

Mu'amalah Ma'annas mencakup seluruh bentuk hubungan, tanggung jawab, dan kontribusi manusia kepada sesama dalam kehidupan sosial. Islam sangat menekankan pentingnya memberikan manfaat kepada orang lain sebagai bagian dari ibadah sosial. Dalam konteks penelitian ini, dimensi Mu'amalah Ma'annas terwujud melalui kontribusi nyata penelitian terhadap masyarakat, khususnya komunitas pendidikan Islam.

Pertama, penelitian ini berkontribusi langsung kepada institusi pendidikan Islam seperti madrasah, pesantren, dan sekolah Islam yang selama ini mengalami keterbatasan dalam penyediaan alat peraga manasik haji yang berkualitas. Dengan tersedianya sistem pemilihan desain berbasis data, pengelola institusi dapat menentukan desain Ka'bah yang paling efisien tanpa harus melewati proses trial and error yang memboroskan material dan biaya. Hal ini merupakan wujud nyata dari tolong-menolong dalam kebaikan sebagaimana diperintahkan Allah dalam Q.S. Al-Maidah [5]: 2:

..... وَتَعَاوُنُوا عَلَى الْبِرِّ وَالتَّقْوَىٰ وَلَا تَعَاوُنُوا عَلَى الْإِثْمِ وَالْعُدْوَانِ ﴿٢﴾

“..... Dan tolong-menolonglah kamu dalam (mengerjakan) kebajikan dan takwa, dan jangan tolong-menolong dalam berbuat dosa dan permusuhan” (Q.S. Al-Maidah [5]: 2)

Sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini merupakan bentuk ta'awun atau saling menolong di bidang ilmu pengetahuan. Peneliti berbagi pengetahuan dan metode yang dapat langsung diaplikasikan oleh pihak-pihak yang membutuhkan, sehingga manfaat ilmu tidak hanya berhenti pada karya tulis ilmiah semata.

Kedua, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah yang dapat dimanfaatkan oleh peneliti-peneliti selanjutnya. Islam sangat menghargai penyebaran ilmu yang bermanfaat. Rasulullah ﷺ bersabda bahwa di antara amal yang pahalanya terus mengalir setelah seseorang wafat adalah ilmu yang bermanfaat. Dengan mendokumentasikan metode integrasi TOPSIS-PSO untuk pemilihan desain berbasis simulasi, penelitian ini membuka peluang bagi peneliti lain untuk mengembangkan pendekatan serupa pada domain yang lebih luas.

Ketiga, kedudukan orang berilmu yang mengamalkan ilmunya untuk kemaslahatan umat mendapatkan tempat yang mulia dalam Islam. Allah ﷻ berfirman dalam Q.S. Al-Mujadilah [58]: 11:

.... يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ ﴿١١﴾

“..... Allah akan meninggikan orang-orang yang beriman di antaramu dan orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat.” (Q.S. Al-Mujadilah [58]: 11)

Ayat ini menegaskan bahwa pengembangan ilmu pengetahuan yang dilandasi keimanan akan mengangkat derajat seseorang di sisi Allah ﷻ. Penelitian ini, yang mengintegrasikan kecerdasan komputasional dengan tujuan edukatif Islami, merupakan bentuk nyata dari upaya membangun peradaban ilmu yang bermanfaat. Kontribusinya tidak hanya dirasakan secara teknis, tetapi juga menyentuh dimensi sosial dan spiritual komunitas pendidikan Islam secara lebih luas

BAB V

KESIMPULAN

5.1.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, metode TOPSIS yang dioptimasi menggunakan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) berhasil diterapkan untuk menentukan desain model 3D objek Ka'bah terbaik berdasarkan data simulasi pencetakan. Data penelitian diperoleh dari simulasi pencetakan menggunakan PrusaSlicer terhadap sembilan alternatif desain, yang berasal dari kombinasi tiga model STL Ka'bah dan tiga variasi infill density, yaitu 20%, 40%, dan 60%.

Setiap alternatif dievaluasi berdasarkan empat kriteria, yaitu waktu cetak, penggunaan filamen, biaya pencetakan, dan kekuatan relatif hasil cetak. Kriteria waktu cetak, penggunaan filamen, dan biaya pencetakan diperoleh dari hasil simulasi dan perhitungan biaya, sedangkan kekuatan relatif direpresentasikan menggunakan nilai infill density. Data tersebut kemudian disusun ke dalam matriks keputusan sebagai input dalam perhitungan TOPSIS-PSO.

Pada penelitian ini, PSO digunakan untuk mengoptimasi bobot kriteria, sedangkan TOPSIS digunakan untuk menghitung nilai preferensi dan melakukan perankingan alternatif. Hasil optimasi PSO menghasilkan bobot kriteria sebesar 0,0437 untuk waktu cetak, 0,3875 untuk penggunaan filamen, 0,1675 untuk biaya pencetakan, dan 0,4013 untuk kekuatan relatif. Bobot terbesar terdapat pada kriteria kekuatan relatif dan penggunaan filamen, sehingga kedua kriteria tersebut memiliki pengaruh paling besar dalam proses perankingan alternatif.

Hasil perankingan menggunakan TOPSIS dengan bobot hasil optimasi PSO menunjukkan bahwa alternatif A3, yaitu model STL 1 dengan infill density 60%, memperoleh nilai preferensi tertinggi sebesar 0,8440. Dengan demikian, A3 ditetapkan sebagai desain model 3D Ka'bah terbaik dalam penelitian ini. Alternatif tersebut dinilai memiliki keseimbangan paling baik antara kekuatan relatif hasil cetak dan efisiensi sumber daya dibandingkan alternatif lainnya.

Dengan demikian, integrasi metode TOPSIS dan PSO mampu memberikan proses pengambilan keputusan yang lebih sistematis, objektif, dan berbasis data simulasi dalam pemilihan desain model 3D objek Ka'bah.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang ada, saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut.

- a. Penelitian selanjutnya sebaiknya melakukan validasi melalui pencetakan fisik secara langsung, sehingga hasil simulasi dari perangkat lunak slicer dapat dibandingkan dengan kondisi aktual pencetakan, baik dari segi waktu, penggunaan material, maupun biaya produksi.
- b. Kriteria kekuatan pada penelitian berikutnya sebaiknya tidak hanya direpresentasikan oleh infill density, tetapi juga dilengkapi dengan pengujian mekanik langsung seperti uji tarik atau uji tekan agar representasi kekuatan hasil cetak menjadi lebih akurat.
- c. Penelitian selanjutnya dapat menambahkan kriteria evaluasi lain, seperti akurasi dimensi, kualitas permukaan, dan estetika visual, agar proses pemilihan

desain menjadi lebih komprehensif dan sesuai dengan kebutuhan aplikasi yang lebih luas.

- d. Parameter algoritma PSO, seperti jumlah partikel, jumlah iterasi, faktor inersia, serta koefisien kognitif dan sosial, perlu diuji lebih lanjut melalui proses tuning parameter agar diperoleh konfigurasi optimasi yang lebih robust dan berpotensi menghasilkan bobot kriteria yang lebih optimal.
- e. Sistem pengambilan keputusan yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat diterapkan lebih lanjut pada objek model 3D lain di luar Ka'bah, sehingga manfaat integrasi TOPSIS-PSO dapat diperluas untuk mendukung pemilihan desain model 3D pada berbagai kebutuhan edukatif maupun teknis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdalwahab, S. T., Rabeaa, M. M., Al-Saedi, H. F. S., Shahlaa, M. J., Hussain, J. H., Mohammed, M., Alhani, I., & Taha, A. S. J. (2025). Energy consumption analysis of SLA and FDM printing: A comparative study using power meter data. *Applied Chemical Engineering*, 8(4). <https://doi.org/10.59429/ace.v8i4.5737>
- Afriyani, S., & Fajriyah, R. (2026). A GENETIC ALGORITHM–PARTICLE SWARM OPTIMIZATION OPTIMIZED DOFCM APPROACH TO ENHANCE CLUSTERING AND OUTLIER DETECTION. *Barekeng*, 20(2), 1453–1472. <https://doi.org/10.30598/barekengvol20iss2pp1453-1472>
- Agrawaal, H., & Thompson, J. E. (2021). Additive manufacturing (3D printing) for analytical chemistry. In *Talanta Open* (Vol. 3). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2021.100036>
- Alonso Lara-Vargas, F., Vargas-Salgado, C., & Suarez, O. J. (n.d.). Temperature Prediction for Photovoltaic Inverters Using Particle Swarm Optimization-Based Symbolic Regression: A Comparative Study. In *IJACSA International Journal of Advanced Computer Science and Applications* (Vol. 16, Number 2). Retrieved www.ijacsa.thesai.org
- Amal, M. A., Napitupulu, H., & Sukono. (2024). Particle Swarm Optimization Algorithm for Determining Global Optima of Investment Portfolio Weight Using Mean-Value-at-Risk Model in Banking Sector Stocks. *Mathematics*, 12(24). <https://doi.org/10.3390/math12243920>
- Cahyati, S., & Putra, R. A. (2023). THE EFFECT OF INFILL PATTERN AND DENSITY PARAMETERS ON TENSILE STRENGTH OF POLYMER MATERIALS IN 3D PRINTING. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 14(3), 753–761. <https://doi.org/10.21776/jrm.v14i3.1005>
- Chernyak, Y., Mohammad, I. A., Masnicak, N., Pivluska, M., & Plesch, M. (2025). Harmonic oscillator based particle swarm optimization. *PLOS ONE*, 20(6 June). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0326173>
- Der, O., & Başar, G. (2025). TOPSIS-based multi-response optimization for improving CO2 laser cutting quality of 3D printed PLA. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 9(2), 118–129. <https://doi.org/10.35860/iarej.1685911>
- Doan Tat, K., Le, V. T., & Duong Van, N. (2024). Prediction models and multi-objective optimization of the single deposited tracks in laser direct metal

deposition of 316L stainless steel. *Manufacturing Review*, 11. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2024012>

Hepler, I. B., & Davids, W. G. (2024). Development of a Novel Beam-Based Finite-Element Approach for the Computationally Efficient Prediction of Residual Stresses and Displacements in Large 3D-Printed Polymer Parts. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/app14198834>

Hezer, S., Gelmez, E., & Özceylan, E. (2021). Comparative analysis of TOPSIS, VIKOR and COPRAS methods for the COVID-19 Regional Safety Assessment. *Journal of Infection and Public Health*, 14(6), 775–786. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2021.03.003>

Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making* (Vol. 186). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>

Khanna, N., Salvi, H., Karaş, B., Fairoz, I., & Shokrani, A. (2024). Cost Modelling for Powder Bed Fusion and Directed Energy Deposition Additive Manufacturing. In *Journal of Manufacturing and Materials Processing* (Vol. 8, Number 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/jmmp8040142>

Kizielewicz, B., Tomczyk, T., Gandor, M., & Sałabun, W. (2024). Subjective weight determination methods in multi-criteria decision-making: a systematic review. *Procedia Computer Science*, 246(C), 5396–5407. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.673>

Lail, N., Andiny, F., & Pradiarti, R. A. (2026). Analisis Konsep Matematika Dasar pada Rangkaian Tawaf dan Sa'i dalam Pembelajaran Matematika Kontekstual. In *Alokantara: Advanced Education Review* (Vol. 1, Number 1). <https://journal.pustakalokapedia.com/index.php/alokantara>

Lamrini, L., Abounaima, M. C., & Talibi Alaoui, M. (2023). New distributed-topsis approach for multi-criteria decision-making problems in a big data context. *Journal of Big Data*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00788-3>

Liu, Y., Tian, Y., Zhang, W., & Wang, Y. (2025). Cooperative modular multilevel converter control based on PSO-optimized fuzzy-PI and hierarchical finite-state model predictive control. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30005-5>

Maspul, K. A. (2025). The Eternal Axis of the Kaaba as Cosmic Nexus and Interfaith Catalyst. *Pubmedia Social Sciences and Humanities*, 2(4), 22. <https://doi.org/10.47134/pssh.v2i4.379>

Mat Zain, F., & Kamaruzaman, K. N. (2022). Sejarah Pembinaan Kaabah oleh Nabi Ibrahim (AS) dan Nabi Ismail (AS) [The History of The Construction of

The Ka'ba by Prophet Ibrahim (PBUH) and Prophet Ismail (PBUH). *Jurnal Islam Dan Masyarakat Kontemporari*, 23(3), 148–165.
<https://doi.org/10.37231/jimk.2022.23.3.702>

Oberloier, S., Whisman, N. G., & Pearce, J. M. (2023). Finding Ideal Parameters for Recycled Material Fused Particle Fabrication-Based 3D Printing Using an Open Source Software Implementation of Particle Swarm Optimization. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 10(6), 1287–1300.
<https://doi.org/10.1089/3dp.2022.0012>

Rashidi Mehrabadi, N., Pircheraghi, G., Ghasemkhani, A., Hosseinpour Sanati, P., Shahidizadeh, A., Kaviani, A., & Sinha Ray, S. (2025). A review on material extrusion additive manufacturing of polycarbonate-based blends and composites: Process-structure-property relationships. In *SPE Polymers* (Vol. 6, Number 2). John Wiley and Sons Inc.
<https://doi.org/10.1002/pls2.10174>

Rezkianti, N., & Lestari, S. (2026). Comparative Study of PSO-Based Machine Learning Models for Early Warning of Student Failure 1 Ni Made. *Indonesian Journal of Artificial Intelligence and Data Mining (IJAIDM)*, 9(1). <https://doi.org/10.24014/ijaidm.v9i1.39201>

Shami, T. M., El-Saleh, A. A., Alswaitti, M., Al-Tashi, Q., Summakieh, M. A., & Mirjalili, S. (2022). Particle Swarm Optimization: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, 10, 10031–10061.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142859>

Shao, C. (2024). Parameter optimization of 3D printing process for ceramic sculptures. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1).
<https://doi.org/10.2478/amns-2024-1322>

Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2024). A Comprehensive Survey and Literature Review on TOPSIS. In *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology* (Vol. 15, Number 1). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/IJSSMET.347947>

Tanoto, Y. Y., Filbert, V., Febrian, R., & Adriel, N. (2022). Optimasi Multirespon pada Proses 3D Printing Material ABS dengan Metode Taguchi-PCR Topsis. *TEKNIK*, 43(2), 147–157.
<https://doi.org/10.14710/teknik.v43i2.43301>

Turek, P. (2025). Design Process for Additive Manufacturing. *Designs*, 9(5), 109.
<https://doi.org/10.3390/designs9050109>

Wang, Y., & Tang, Z. (2025). Enhanced FDM Printing Accuracy in Low-Carbon Production Mode Using RSM-NSGA-II and Entropy Weight TOPSIS

Method. *Journal of Composites Science*, 9(11), 621.
<https://doi.org/10.3390/jcs9110621>