

**RANCANG BANGUN APLIKASI *WATER CONTACT
ANGLE ANALYZER* DENGAN MENGGUNAKAN
METODE *OTSU THRESHOLDING, CANNY EDGE,
HOUGH LINE TRANSFORM* DAN *CIRCLE FITTING*
CURVE BERBASIS PYTHON**

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan
mencapai derajat Sarjana S-1.

Program studi fisika



Diajukan Oleh :

Trengginas Wibowo Shidiq
22106020003

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI UNIVERSITAS
ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA
2026**

LEMBAR PENGESAHAN



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

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1827/Un.02/DST/PP.00.9/08/2026

Tugas Akhir dengan judul : RANCANG BANGUN APLIKASI WATER CONTACT ANGLE ANALYZER DENGAN MENGGUNAKAN METODE OTSU THRESHOLDING, CANNY EDGE, HOUGH LINE TRANSFORM DAN CIRCLE FITTING CURVE BERBASIS PYTHON

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : TRENGGINAS WIBOWO SHIDIQ
Nomor Induk Mahasiswa : 22106020003
Telah diujikan pada : Senin, 10 Agustus 2026
Nilai ujian Tugas Akhir : A

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

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Frida Agung Rakhmadi, S.Si., M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 6a7ae516d57dc



Penguji I

Ade Kurniawan, M.Si., Ph.D.
SIGNED

Valid ID: 6a7abe3142839



Penguji II

Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D.
SIGNED

Valid ID: 6a7a6dc86bfff



Yogyakarta, 10 Agustus 2026

UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

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

Valid ID: 6a7d396d5ac30

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Trengginas Wibowo Shidiq

NIM : 22106020003

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan dengan sesungguhnya, bahwa skripsi saya yang berjudul "Rancang Bangun Aplikasi *Water Contact Angle Analyzer* dengan Menggunakan Metode *Otsu Thresholding*, *Canny Edge*, *Hough Line Transform* dan *Circle Fitting Curve* Berbasis Python" adalah hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diujikan untuk memperoleh gelar sarjana di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 16 Juli 2026

Penulis




Trengginas Wibowo Shidiq
NIM. 22106020003

SURAT PERSETUJUAN TUGAS AKHIR



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan Skripsi

Lamp : -

Kepada
Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta
di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Trenginas Wibowo Shidiq
NIM : 22106020003
Judul Skripsi : Rancang Bangun Aplikasi *Water Contact Angle Analyzer* dengan Menggunakan Metode *Otsu Thresholding*, *Canny Edge*, *Hough Line Transform* dan *Circle Fitting Curve* Berbasis Python

sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Fisika.

Dengan ini kami mengharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Pembimbing II

Dr. Shidiq Nur Hidayat, S.Si., M.Sc.
NIP. 19900627 202406 1 001

Yogyakarta, 17 Juli 2025
Pembimbing I

Frida Agung Rakhmadi, S.Si., M.Sc.
NIP. 19780510 200501 1 003

HALAMAN MOTTO

QS. Al-Insyirah: 7

“Maka apabila engkau telah selesai (dari suatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain)”

Ultraman Geed

"Diam saja tidak ada gunanya."

HALAMAN PERSEMBAHAN

Skripsi ini penulis persembahkan kepada diri sendiri atas segala perjuangan yang telah dilalui. Karya ini juga penulis persembahkan kepada mendiang ibunda tercinta, Suci Ayismi, yang selalu hidup dalam hati, serta kepada ayahanda Ihsan Munajat, kakanda Fathurrohman, dan adik-adik tercinta, Raka, Raga, dan Ragil. Terima kasih atas doa, kasih sayang, dukungan, dan pengorbanan yang tiada henti. Semoga karya sederhana ini menjadi wujud rasa syukur, hormat, dan terima kasih penulis.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Rancang Bangun Aplikasi *Water Contact Angle Analyzer* dengan Menggunakan Metode *Otsu Thresholding*, *Canny Edge*, *Hough Line Transform* dan *Circle Fitting Curve* Berbasis Python” dengan baik. Penulisan tugas akhir ini dilatarbelakangi oleh pentingnya pengembangan teknologi instrumen alternatif dalam karakterisasi material, khususnya pemanfaatan pendekatan *computer vision* dan otomatisasi pengolahan citra digital untuk analisis pengukuran sudut kontak air secara lebih efisien dan objektif. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan memvalidasi aplikasi perangkat lunak yang mampu mengukur sudut kontak air secara akurat dan presisi. Cakupan penelitian ini meliputi pengembangan perangkat lunak berbasis Python, perancangan antarmuka pengguna (GUI), serta pengujian kinerja sistem yang telah dibuat dengan membandingkannya terhadap pengukuran manual aplikasi ImageJ. Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa banyak pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, serta bimbingan, sehingga pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, serta hidayah-Nya sehingga penulis diberikan kelancaran dan kemudahan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua tercinta Almarhumah Ibunda dan ayah, atas doa, dukungan, motivasi, serta pengorbanan dalam membiayai pendidikan penulis sejak awal hingga selesai.

3. Kak Fathurrohman dan adik-adikku Raka, Raga dan Ragil yang telah memberikan dukungan, semangat, serta bantuan baik secara moril maupun materiil selama proses perkuliahan.
4. Bapak Prof. H. Noorhaidi Hasan, S.Ag., M.A., M.Phil., Ph.D. selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
5. Ibu Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardani, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
6. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si. selaku Ketua Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
7. Bapak Frida Agung Rakhmadi, S.Si., M.Sc. Selaku Dosen Pembimbing I yang senantiasa memberikan arahan, masukan, wawasan, serta motivasi yang sangat berarti dalam proses penyusunan skripsi ini.
8. Dr. Shidiq Nur Hidayat, S.Si., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan serta arahan, baik secara teknis maupun akademik, selama proses penelitian dan penulisan skripsi ini.
9. Seluruh dosen Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta yang telah memberikan ilmu, bimbingan, dan wawasan selama masa perkuliahan.
10. Ibu Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D selaku Dosen Pembimbing Akademik Program Studi Fisika angkatan 2022 serta dosen penguji dan Ade Kurniawan, M.Si., Ph.D. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik, saran, serta masukan yang membangun demi penyempurnaan skripsi ini.
11. Mas Yulian dan rekan-rekan peneliti Lab Material dan Instrumentasi UGM yang telah banyak membantu dan memberikan bimbingan secara teknis dan akademis dalam penelitian ini.

12. Keluarga besar pondok pesantren Al-ghozali yang senantiasa menjadi tempat saya bernaung, belajar agama, serta memberikan banyak pengalaman.
13. Teman teman ANGKATAN '22 PRIDE dan Info Hiling yang selalu senantiasa menjadi teman dan penghibur selama proses perkuliahan
14. Teman-teman Instrumentasi Fisika angkatan 2022 yang telah menjadi keluarga selama masa perkuliahan, serta selalu memberikan dukungan, semangat, dan kebersamaan yang berkesan.
15. Teman-teman Pingkiboy dan Umecour 2022 yang senantiasa memberikan hiburan, canda tawa, serta kebersamaan di waktu senggang.
16. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah memberikan doa, bantuan, dukungan, dan semangat dalam penyusunan tugas akhir ini.
17. Diri penulis sendiri yang telah berusaha, berproses, dan bertahan hingga mampu menyelesaikan tugas akhir ini dengan sebaik-baiknya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif guna penyempurnaan karya ini di masa mendatang.

Yogyakarta, 21 Juli 2026

Trengginas Wibowo Shidiq

**RANCANG BANGUN APLIKASI *WATER CONTACT ANGLE*
ANALYZER DENGAN MENGGUNAKAN METODE *OTSU*
THRESHOLDING, *CANNY EDGE*, *HOUGH LINE*
TRANSFORM DAN *CIRCLE FITTING CURVE* BERBASIS
PYTHON**

Trengginas Wibowo Shidiq
22106020003

INTISARI

Telah dilakukan penelitian rancang bangun aplikasi *Water Contact Angle (WCA) Analyzer* berbasis *computer vision* menggunakan Python untuk mengukur sudut kontak air secara otomatis. Aplikasi mengintegrasikan tahapan *Image Preprocessing*, segmentasi citra menggunakan *Otsu Thresholding*, deteksi *baseline* menggunakan *Canny Edge* dan *Hough Line Transform*, rekonstruksi profil tetesan menggunakan *Circle Fitting Curve*, hingga penghitungan sudut kontak dan klasifikasi kebasahan permukaan secara otomatis melalui antarmuka pengguna berbasis PyQt5. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap ImageJ (plugin LB-ADSA) menggunakan 120 citra mikroskopis Dino-Lite (perbesaran 220x) yang mencakup 24 nilai sudut pada sampel hidrofilik dan hidrofobik. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata *Mean Absolute Error* (MAE) sebesar $0,74^{\circ}$, akurasi 99,40%, dan presisi 99,74% terhadap ImageJ, dengan nilai *Root Mean Squared Error* (RMSE) sebesar $1,7249^{\circ}$ yang mengindikasikan penyimpangan didominasi oleh eror sistematis akibat asumsi geometri *Circle Fitting* pada sudut kontak tinggi ($>120^{\circ}$). Aplikasi juga berhasil mengklasifikasikan seluruh sampel ke dalam kategori kebasahan yang tepat dengan akurasi 100%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa aplikasi WCA Analyzer yang dikembangkan mampu memberikan pengukuran sudut kontak air yang akurat, presisi, dan konsisten, sehingga berpotensi menjadi alternatif instrumen pengukuran kebasahan permukaan yang objektif, otomatis, dan terjangkau.

Kata kunci: Sudut Kontak Air, *Computer Vision*, *Otsu Thresholding*, *Circle Fitting*, Python.

**RANCANG BANGUN APLIKASI *WATER CONTACT ANGLE*
ANALYZER DENGAN MENGGUNAKAN METODE *OTSU*
THRESHOLDING, CANNY EDGE, HOUGH LINE
TRANSFORM DAN *CIRCLE FITTING CURVE* BERBASIS
PYTHON**

Trengginas Wibowo Shidiq
22106020003

ABSTRACT

An automated Water Contact Angle (WCA) Analyzer application based on computer vision was developed using Python to automatically measure water contact angle. The application integrates Image Preprocessing, image segmentation using Otsu Thresholding, baseline detection using Canny Edge and Hough Line Transform, droplet profile reconstruction using Circle Fitting Curve, and automatic contact angle calculation and wettability classification, accessible through a PyQt5-based graphical user interface. Validation was performed by comparing the results with ImageJ (LB-ADSA plugin) using 120 microscopic images from a Dino-Lite microscope (220x magnification), covering 24 angle values from hydrophilic and hydrophobic samples. The results show an average Mean Absolute Error (MAE) of 0.74° , an accuracy of 99.40%, and a precision of 99.74% relative to ImageJ, with a Root Mean Squared Error (RMSE) of 1.7249° , indicating that the deviation was dominated by systematic error caused by the geometric assumption of Circle Fitting at high contact angles ($>120^{\circ}$). The application also successfully classified all samples into the correct wettability category with 100% accuracy. These results demonstrate that the developed WCA Analyzer application provides accurate, precise, and consistent contact angle measurements, offering a promising, objective, automated, and affordable alternative for surface wettability characterization.

Keywords: Water Contact Angle, Computer Vision, Otsu Thresholding, Circle Fitting, Python

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iii
SURAT PERSETUJUAN TUGAS AKHIR.....	iv
HALAMAN MOTTO.....	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
INTISARI.....	ix
<i>ABSTRACT</i>	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	18
1.1 Latar Belakang.....	18
1.2 Rumusan Masalah.....	8
1.3 Tujuan Penelitian	8
1.4 Batasan Masalah.....	8
1.5 Manfaat Penelitian.....	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Studi Pustaka	10
2.2 Landasan Teori.....	19
2.2.1 Fisika Permukaan dan Kebasahan.....	19
2.2.2 Sudut Kontak.....	20
2.2.3 Persamaan Young.....	20
2.2.4 <i>Water Contact Angle</i>	22
2.2.5 Akuisisi Citra Tetesan Air	25
2.2.6 Deteksi Droplet Air dalam Pengukuran Sudut Kontak.....	35

2.2.7	Konsep <i>Baseline</i> dalam Pengukuran Sudut Kontak	38
2.2.8	Algoritma Deteksi Tepi <i>Canny</i> sebagai Dasar Deteksi <i>Baseline</i>	39
2.2.9	Konsep Dasar <i>Curve Fitting</i>	44
2.2.10	<i>Software</i> dan <i>Tools</i> Pengembangan Aplikasi Sudut kontak air	50
2.2.11	Pengujian Aplikasi	54
2.2.12	Tafsir Q.S. al-Qamar ayat 49	66
BAB III METODE PENELITIAN		67
3.1.	Waktu dan Tempat Penelitian	67
3.1.1.	Waktu Penelitian	67
3.1.2.	Tempat Penelitian	68
3.2.	Alat dan Bahan Penelitian	68
3.2.1	Alat Penelitian	68
3.2.2	Bahan Penelitian	69
3.3	Prosedur Penelitian	70
3.3.1	Proses Manajemen Dataset	71
3.3.2	Proses <i>Image Preprocessing</i>	72
3.3.3	Proses Segmentasi Droplet Air	78
3.3.4	Proses Ekstraksi dan Seleksi Kontur Droplet Air	80
3.3.5	Proses Deteksi <i>Baseline</i>	86
3.3.6	Proses Rekonstruksi Bentuk Droplet Air	89
3.3.7	Proses Penentuan Titik Kontak (<i>Contact Point</i>)	90
3.3.8	Proses Penghitungan Sudut Kontak	92
3.3.9	Proses Klasifikasi Kebasahan	93
3.3.10	Proses Perancangan Antarmuka Pengguna (<i>Frontend</i>)	94
3.3.11	Proses Pengujian Performa Aplikasi	97
3.3.12	Proses Pengolahan data	98
3.4	Rencana Pembahasan Hasil Penelitian	100
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		103

4.1	Hasil Penelitian.....	103
4.1.1	Hasil Image Preprocessing.....	103
4.1.2	Hasil Segmentasi <i>Otsu Thresholding</i>	106
4.1.3	Hasil Ekstraksi dan Seleksi Kontur.....	107
4.1.4	Hasil Deteksi Baseline	108
4.1.5	Hasil Rekonstruksi dengan <i>Circle Fitting</i>	109
4.1.6	Hasil Penentuan Titik Kontak	110
4.1.7	Hasil Penghitungan Sudut Kontak	111
4.1.8	Hasil Klasifikasi Sudut Kontak	111
4.1.9	Hasil Desain GUI.....	113
4.1.10	Hasil Validasi Alat	115
4.2	Pembahasan Hasil Penelitian	118
4.2.1	Pembahasan <i>Image Preprocessing</i>	118
4.2.2	Pembahasan Segmentasi <i>Otsu Thresholding</i>	132
4.2.3	Pembahasan Ekstraksi dan Seleksi Kontur	134
4.2.4	Pembahasan Deteksi Baseline	139
4.2.5	Pembahasan Rekonstruksi Circle Fitting	146
4.2.6	Pembahasan Penentuan Titik Kontak	151
4.2.7	Pembahasan Penghitungan Sudut Kontak	153
4.2.8	Pembahasan Klasifikasi kebasahan.....	157
4.2.9	Pembahasan GUI.....	161
4.2.10	Pembahasan Validasi Akurasi , Presisi dan Jenis Error	167
4.3	Integrasi Interkoneksi.....	178
BAB V PENUTUP		180
5.1	Kesimpulan	180
5.2	Saran.....	182
DAFTAR PUSTAKA.....		183
LAMPIRAN.....		195

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tinjauan pustaka	16
Tabel 2.2 Lanjutan	17
Tabel 2.3 lanjutan.....	18
Tabel 3.1 Perangkat Lunak (<i>Software</i>)	68
Tabel 3.2 Tabel hasil pengukuran sudut kontak air	98
Tabel 4.1 Tabel validasi klasifikasi kebasahan WCA Analyzer.....	111
Tabel 4.2 lanjutan.....	112
Tabel 4.3 Hasil Validasi Presisi.....	115
Tabel 4.4 Hasil validasi akurasi	116
Tabel 4.5 Hasil pengujian jenis eror	117



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gaya tegangan antarmuka pada titik kontak tiga fase.....	21
Gambar 2.2	Setup metode <i>Sessile drop</i>	25
Gambar 2.3	Citra Dengan Banyak <i>Noise</i>	27
Gambar 2.4	Citra Blur dan Distorsi	28
Gambar 2.5	Citra dengan pencahayaan tidak merata.....	29
Gambar 2.6	Tahapan CLAHE	32
Gambar 2.7	Hasil implementasi <i>Gamma correction</i>	33
Gambar 2.8	Contoh hasil segmentasi <i>otsu thresholding</i>	37
Gambar 2.9	Garis <i>Baseline</i> dan Garis Kontur air	39
Gambar 2.10	Deteksi Tepi <i>Canny</i>	41
Gambar 2.11	Hasil <i>Hough Line Transform</i>	42
Gambar 2.12	<i>Curve fitting</i> menggunakan <i>circle fitting</i>	45
Gambar 2.13	Hubungan radius (R), tinggi titik pusat (H), dan jarak horizontal (X) terhadap sudut geometri α	47
Gambar 3.1	Diagram alir tahapan penelitian	70
Gambar 3.2	Tampilan Antarmuka Aplikasi Sudut Kontak Air yang Telah Diimplementasikan.....	96
Gambar 4.1	Hasil grayscale	103
Gambar 4.2	Hasil CLAHE.....	104
Gambar 4.3	Hasil gamma correction	104
Gambar 4.4	Hasil median blur	105
Gambar 4.5	Hasil unsharp masking	106
Gambar 4.6	Hasil otsu thresholding.....	106
Gambar 4.7	Tahapan seleksi kontur (a) identifikasi apex, (b) pemisahan kontur, (c) penghapusan refleksi, dan (d) kontur akhir.....	108
Gambar 4.8	Hasil deteksi tepi canny	108
Gambar 4.9	Hasil hough line transform.....	109
Gambar 4.10	Hasil circle fitting.....	110
Gambar 4.11	Hasil penentuan titik kontak.....	110
Gambar 4.12	Hasil penghitungan sudut kontak	111
Gambar 4.13	(a) Tampilan GUI mode Load Folder (Batch). (b) Tampilan GUI mode Live Camera dan Load Single Image.....	113
Gambar 4.14	Menu pilihan sumber input	114
Gambar 4.15	Fitur integrasi dan kontrol Hardware mikroskop Dino-Lite	114
Gambar 4.16	Perbandingan citra sebelum dan sesudah penerapan CLAHE ..	120
Gambar 4.17	Perbandingan citra CLAHE dan gamma correction.....	124

Gambar 4.18 Perbandingan citra <i>median blur</i> dan <i>gamma correction</i>	127
Gambar 4.19 Perbandingan citra <i>median blur</i> dan <i>unsharp masking</i>	129



DAFTAR LAMPIRAN

Gambar Lampiran 1	Proses pembuatan perangkat lunak	195
Gambar Lampiran 2	Proses validasi perangkat lunak.....	195
Gambar Lampiran 3	Program <i>image preprocessing</i>	196
Gambar Lampiran 4	Program <i>otsu thresholding</i>	196
Gambar Lampiran 5	Program deteksi <i>baseline</i>	197
Gambar Lampiran 6	Program <i>circle fitting</i>	197
Gambar Lampiran 7	Program penentuan titik kontak.....	198
Gambar Lampiran 8	Program penghitungan sudut kontak	199
Gambar Lampiran 9	Program klasifikasi kebasahan	199



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Wettability atau kebasahan merupakan fenomena yang menggambarkan kecenderungan cairan saat berinteraksi dengan permukaan padat material. Dalam karakterisasi sifat kebasahan material, salah satu parameter utama yang umum digunakan adalah sudut kontak air (*Water Contact Angle*). Nilai sudut kontak air menjadi standar penting dalam pengklasifikasian sifat permukaan material (Zhao dan Jiang, 2018). Kebasahan menjadi parameter penting dalam berbagai aplikasi, mulai dari aplikasi biomedis, pertanian, hingga teknologi pengecatan, pencetakan, dan pelapisan material (Si dkk., 2018).

Dalam bidang biomedis, tingkat kebasahan material menentukan keberhasilan dalam operasi integrasi implan tulang dengan jaringan tubuh. Sedangkan, dalam pertanian kebasahan berperan dalam menentukan tingkat efisiensi penyebaran pestisida pada daun tanaman (Kovalchuk dan Simmons, 2021; Shin dkk., 2016). Melihat pentingnya kebasahan tersebut, pengukuran kebasahan harus dilakukan secara akurat. Kesalahan dalam karakterisasi sifat ini dapat berakibat fatal terhadap performa material (Orella dkk., 2021). Hal ini menegaskan bahwa pemahaman akurat mengenai kebasahan adalah kebutuhan mendesak dalam sains material modern.

Dalam perspektif Islam, fenomena alam termasuk interaksi antar material dipandang sebagai manifestasi dari *Sunnatullah* (Thalib, 2015). Hal ini tercermin dalam Q.S. al-Qamar ayat 49:

إِنَّا كُلَّ شَيْءٍ خَلَقْنَاهُ بِقَدَرٍ

"*Sesungguhnya Kami menciptakan segala sesuatu menurut ukuran (qadar).*"

Dalam tafsir tahlili ayat ini menjelaskan bahwa seluruh peristiwa di alam semesta terjadi sesuai dengan ketetapan (takdir) Allah yang telah ditentukan dengan sempurna. Meskipun demikian, manusia tetap

diwajibkan untuk berusaha dan tidak boleh hanya berserah diri tanpa ikhtiar, karena setiap orang akan memperoleh hasil sesuai usahanya. Setelah berusaha secara maksimal, seorang mukmin diperintahkan untuk bertawakal dan menerima hasilnya sebagai ketentuan Allah, seraya meyakini bahwa Allah tidak akan mengubah keadaan suatu kaum hingga mereka berusaha mengubah keadaan diri mereka sendiri (Hasbi, 2023).

Konsep "ukuran" atau *qadar* dalam ayat ini mengisyaratkan bahwa setiap fenomena di alam semesta diciptakan dengan penghitungan yang teliti, hukum yang pasti, dan proporsi yang seimbang. Nilai ini sangat relevan dengan etos penelitian ilmiah yang menuntut objektivitas dan ketelitian tinggi dalam pengukuran kuantitatif. Oleh karena itu, upaya untuk mengukur parameter fisik seperti sudut kontak dengan presisi tinggi bukan hanya sekadar aktivitas akademis (Fatar dan Abdullah, 2023). Kegiatan tersebut juga dapat dipandang sebagai bentuk tafakur terhadap keteraturan ciptaan-Nya. Hal ini menuntut instrumen dan metode pengukuran yang akurat serta dapat dipertanggungjawabkan.

Pengukuran sudut kontak air memiliki peran penting dalam karakterisasi material. Oleh karena itu, keakuratan dan kepresisian pengukuran harus dijaga. Hal ini disebabkan karena interpretasi sifat kebasahan sangat sensitif terhadap perubahan kecil pada nilai sudut. Kesalahan kecil dalam pengukuran dapat menyebabkan kesalahan klasifikasi sifat material (Beketov dan Shynkarenko, 2022). Oleh karena itu, pengembangan teknik deteksi kontur droplet air yang tangguh atau *robust* menjadi kebutuhan penting untuk mendapatkan data yang baik.

Metode standar yang umum digunakan untuk menghitung nilai sudut kontak air adalah *sessile drop goniometry*. Metode ini digunakan karena kesederhanaan dan fleksibilitasnya dalam menangani berbagai jenis material (Huhtamäki dkk., 2018). Metode ini melibatkan penempatan tetesan cairan pada permukaan substrat, kemudian dilakukan akuisisi citra digital. Citra tersebut selanjutnya dianalisis untuk menentukan kontur tetesan sehingga sudut kontak dapat dihitung menggunakan algoritma *curve fitting* matematis. Proses analisis citra ini biasanya melibatkan proses segmentasi droplet air, deteksi garis dasar atau *baseline*, serta penerapan algoritma *curve fitting*, seperti model Young–Laplace, lingkaran, elips, atau

polinomial, untuk menentukan garis singgung pada titik kontak (Ponomar dkk., 2022).

Secara detail Pemrosesan citra digital untuk pengukuran sudut kontak air melibatkan serangkaian tahapan komputasi yang sistematis guna mengekstraksi informasi geometris secara otomatis. Tahapan awal dimulai dengan proses memisahkan objek tetesan air dari latar belakangnya atau segmentasi (Bangare dkk., 2015). Setelah objek berhasil di pisahkan, sistem melakukan deteksi kontur untuk menelusuri dan menghubungkan titik-titik batas tersebut menjadi sebuah garis kontinu yang merepresentasikan profil kelengkungan tetesan secara nyata. Selanjutnya penentuan *baseline*, yang berfungsi sebagai sumbu rujukan horizontal tempat terjadinya persinggungan antara fase cairan dan permukaan substrat padat (Liu dkk., 2019)

Dengan berbekal titik-titik kontur dan letak *baseline* tersebut, metode *curve fitting* kemudian diaplikasikan untuk membangun persamaan fungsi matematis yang mampu merekonstruksi bentuk lengkungan antarmuka fluida secara mulus dan ideal (Andersen dan Taboryski, 2017). Pada tahapan akhir, penghitungan turunan gradien dari kurva matematis tersebut dievaluasi tepat pada titik perpotongannya dengan *baseline*, sehingga sistem dapat mengkalkulasi dan mengeluarkan hasil nilai sudut kontak air secara akurat dan objektif (Ponomar dkk., 2022).

Tantangan dalam karakterisasi kebasahan material adalah keterbatasan akses terhadap perangkat pengukur sudut kontak air komersial. Instrumen tersebut umumnya memiliki harga yang tinggi, baik dari sisi perangkat keras maupun lisensi perangkat lunaknya. Selain itu, perangkat lunak yang disediakan oleh pabrikan biasanya bersifat tertutup (*closed source*) sehingga sulit diakses oleh pengguna secara bebas (Chalise dkk., 2023). Kondisi ini menjadi kendala bagi banyak laboratorium pendidikan dan penelitian berskala kecil dalam melakukan karakterisasi kebasahan secara luas (Orella dkk., 2021). Oleh karena itu, pengembangan perangkat lunak *open-source* yang ekonomis namun tetap andal menjadi solusi yang dibutuhkan untuk memperluas akses terhadap teknologi pengukuran kebasahan.

Sejumlah penelitian terdahulu telah berupaya mengatasi permasalahan-permasalahan tersebut dengan memanfaatkan pendekatan berbasis citra digital. Pendekatan ini memungkinkan pengembangan sistem pengukuran sudut kontak yang lebih sederhana dan terjangkau, misalnya melalui penggunaan kamera smartphone dan perangkat lunak analisis terbuka yang dilakukan oleh Chalise dkk., pada tahun 2023. Selain itu, Akbari dan Antonini pada tahun 2021 mengembangkan perangkat lunak *open-source* seperti DropPy untuk mendukung analisis sudut kontak secara semi-otomatis dan Orella dkk pada tahun 2021 telah mengembangkan aplikasi *Drophen high-throughput* berbasis Python. Perkembangan lebih lanjut juga mengarah pada otomatisasi analisis citra secara dinamis untuk meningkatkan konsistensi dan standarisasi proses pengukuran (Akbari dkk., 2025). Pendekatan berbasis *Machine Learning* juga mulai diterapkan untuk mengurangi distorsi optik dan subjektivitas pada metode *fitting* konvensional sehingga menghasilkan pengukuran yang lebih *robust* (Kabir dan Garg, 2023).

Meskipun berbagai perangkat lunak komersial maupun *semiopen-source*, seperti DropPy, Drophen, dan ImageJ, telah dikembangkan untuk mempermudah pengukuran sudut kontak, proses pengoperasiannya masih sering mengandalkan operator dalam menentukan droplet dan *baseline* (Orella dkk., 2021). Pengukuran manual yang mengandalkan intervensi manusia memiliki keterbatasan signifikan terkait subjektivitas operator dalam menentukan *baseline* dan titik singgung tetesan (Vuckovac dkk., 2019). Selain itu, analisis data foto dan video secara manual sangat memakan waktu serta rentan terhadap bias pengguna. Kondisi ini pada akhirnya dapat menurunkan *repeatability* dan *reproducibility* dari data yang dihasilkan (Kabir dan Garg, 2023). Kesalahan penempatan *baseline* secara manual, meskipun sekilas tampak tidak signifikan, dapat mendistorsi penghitungan sudut secara substansial. Oleh karena itu, otomatisasi analisis menjadi kebutuhan mendesak untuk meminimalkan faktor *human error* (Orella dkk., 2021).

Meskipun berbagai pendekatan berbasis citra digital dan perangkat lunak *open source* telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan menekan biaya pengukuran sudut kontak air, sejumlah keterbatasan teknis

masih ditemukan. Sistem berbasis kamera sederhana, seperti penggunaan smartphone, rentan terhadap ketidakstabilan pengambilan citra, keterbatasan resolusi optik, serta variasi pencahayaan yang dapat menurunkan akurasi kontur tetesan (Chalise dkk., 2023). Selain itu, sebagian besar perangkat lunak *open-source* yang tersedia masih bersifat semi-otomatis, sehingga tetap memerlukan intervensi pengguna dalam menentukan parameter awal seperti *baseline* dan area droplet, yang berpotensi menimbulkan subjektivitas dan menurunkan konsistensi hasil pengukuran (Orella dkk., 2021).

Pendekatan berbasis kecerdasan buatan, seperti *Machine Learning* khususnya *Deep Learning* menggunakan *Convolutional Neural Networks* (CNN), menawarkan potensi peningkatan akurasi analisis dalam citra. Namun demikian, metode ini memiliki keterbatasan dalam penerapan praktis. Kebutuhan akan dataset terlabel dalam jumlah besar, tuntutan komputasi tinggi seperti penggunaan GPU, serta sifat model yang cenderung tidak transparan (*black box*) menjadi tantangan utama dalam penerapannya pada laboratorium lingkungan yang terbatas (Abdou, 2022; Nnolim, 2020; Rabbani dkk., 2023).

Berdasarkan permasalahan tersebut, masih terdapat kebutuhan akan suatu pendekatan alternatif yang mampu mengatasi keterbatasan metode konvensional dan kompleksitas pendekatan berbasis *deep learning*. Pendekatan yang diharapkan mampu memberikan hasil pengukuran yang akurat, konsisten, serta tetap efisien dan mudah diimplementasikan dalam berbagai kondisi eksperimen. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan *computer vision* berbasis otomatisasi pengolahan citra dengan memanfaatkan kombinasi metode *image preprocessing* yang adaptif, segmentasi *otsu thresholding*, penentuan *baseline* menggunakan deteksi tepi *Canny* terkombinasi *hough line transform*, dan *Circle Fitting Curve*. Pendekatan ini berfokus pada ekstraksi fitur citra melalui beberapa proses. Proses tersebut memanfaatkan algoritma pengolahan citra yang dapat ditelusuri secara matematis serta diimplementasikan menggunakan bahasa pemrograman Python (Orella dkk., 2021).

Pemrosesan citra dalam sistem pengukuran sudut kontak air berbasis *computer vision* dilakukan melalui serangkaian tahapan yang sistematis untuk mengekstraksi informasi geometri tetesan secara otomatis. Tahapan diawali dengan *image pre-processing* yang meliputi konversi citra ke *greyscale*, reduksi *noise* serta peningkatan kualitas citra (Stimper dkk., 2019; Wang dkk., 2020). Selanjutnya proses segmentasi dilakukan untuk memisahkan objek tetesan dari latar belakang menggunakan metode algoritma *Otsu thresholding* (Al Darwich dkk., 2022; Liu dkk., 2017). Setelah objek tersegmentasi, deteksi tepi dilakukan menggunakan algoritma Canny untuk mengekstraksi kontur tetesan secara presisi (Onyedima dkk., 2025). Kontur yang diperoleh kemudian digunakan dalam proses deteksi *baseline* dengan *Hough Line Transform* (Vuckovac dkk., 2019). Pada tahap akhir, metode *curve fitting* seperti *Circle Fitting* digunakan untuk merekonstruksi bentuk tetesan secara matematis, sehingga sudut kontak dapat dihitung melalui evaluasi gradien garis singgung pada titik perpotongan antara *Circle Fitting Curve* dan *baseline* (Thomsen, 2008).

Pemilihan kombinasi metode dalam penelitian ini didasarkan pada keunggulan masing-masing algoritma dalam mendukung akurasi dan stabilitas pengukuran. Metode *Otsu thresholding* dipilih karena kemampuannya dalam memisahkan objek dan latar belakang secara otomatis dengan meminimalkan varian intra-kelas, sehingga menghasilkan segmentasi yang optimal tanpa intervensi pengguna (Al Darwich dkk., 2022). Algoritma Canny digunakan karena mampu menghasilkan deteksi tepi yang lebih presisi (Onyedima dkk., 2025). Sementara itu, penggunaan *Hough Line Transform* dalam penentuan *baseline* memungkinkan identifikasi secara objektif, sehingga dapat mengurangi kesalahan akibat pengukuran pergeseran piksel yang sangat kecil (Vuckovac dkk., 2019b). Pada tahap pemodelan, metode *pemasangan lingkaran* dipilih karena kemudahan matematis dan kemampuannya dalam mewakili bentuk tetesan yang mendekati profil simetri sehingga memberikan hasil estimasi yang stabil dan efisien secara komputasi (Thomsen, 2008).

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pengukuran sudut kontak air

berbasis *computer vision* yang akurat dan otomatis. Secara khusus, penelitian ini mencakup perancangan dan implementasi aplikasi perangkat lunak berbasis Python yang mengintegrasikan algoritma *thresholding*, deteksi tepi Canny, serta metode *curve fitting* dalam proses analisis citra tetesan. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dan tingkat akurasi sistem yang dikembangkan melalui proses validasi dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap metode konvensional menggunakan perangkat lunak ImageJ pada dataset citra mikroskopis yang diakuisisi menggunakan perangkat Dino-Lite.

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam pengembangan metode pengukuran sudut kontak air yang lebih efisien, objektif, dan terjangkau. Secara praktis, sistem yang dikembangkan dapat menjadi alternatif instrumen pengukuran berbasis perangkat lunak yang ekonomis dan mudah diakses, sehingga memperluas penggunaan teknologi karakterisasi kebasahan di lingkungan laboratorium pendidikan maupun penelitian berskala kecil. Selain itu, otomatisasi proses analisis citra mampu mengurangi subjektivitas dan *human error* yang umumnya terjadi pada pengukuran manual, sehingga meningkatkan konsistensi dan keandalan data. Dari sisi akademis, penelitian ini juga berkontribusi dalam pengembangan aplikasi pengolahan citra digital untuk karakterisasi material, serta membuka peluang penelitian lanjutan dalam integrasi metode *computer vision* untuk sistem pengukuran yang lebih canggih dan adaptif.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, dapat diketahui rumusan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Bagaimana rancangan dan hasil aplikasi perangkat lunak pengukur sudut kontak air otomatis terkombinasi metode *Otsu thresholding*, *Canny Edge*, *Hough Line Transform* dan *Circle Fitting Curve* berbasis Python?
2. Seberapa akurat dan presisi aplikasi perangkat lunak pengukur sudut kontak air otomatis dibandingkan dengan pengukuran manual aplikasi ImageJ menggunakan dataset citra mikroskopis Dino-Lite ?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, dapat diketahui tujuan dari penelitian ini adalah

- 1 Merancang dan mengimplementasikan aplikasi perangkat lunak pengukur sudut kontak air otomatis berbasis Python dengan mengintegrasikan algoritma *Otsu Thresholding*, *Canny Edge*, *Hough Line Transform*, dan *Circle Fitting Curve*
- 2 Memvalidasi akurasi dan presisi aplikasi perangkat lunak pengukur sudut kontak air otomatis dibandingkan dengan pengukuran manual aplikasi ImageJ menggunakan dataset citra mikroskopis Dino-Lite.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah digunakan untuk menghindari kesalahan penafsiran terhadap penelitian, batasan masalah penelitian ini adalah

- 1 *Library* yang digunakan meliputi OpenCV, NumPy, SciPy, Matplotlib dan PyQt5.
- 2 Dataset citra yang digunakan adalah data sekunder hasil pengambilan citra mikroskop digital Dino-Lite dengan perbesaran 220x. Jumlah data yang digunakan sebanyak 120 data citra yang terbagi menjadi 24 nilai sudut. Setiap nilai sudut direpresentasikan oleh lima citra yang diambil dengan selang waktu 5 detik pergambar. Format gambar yang digunakan adalah jpg.
- 3 Aplikasi dirancang dan dibuat untuk berjalan di *Personal Computer* (Windows).
- 4 Proses validasi dilakukan dengan membandingkan aplikasi yang dikembangkan dengan aplikasi ImageJ sebagai referensi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Menambah khazanah instrumen dan metode pengukuran sudut kontak air otomatis yang murah dan mudah digunakan.
2. Mengurangi *human error* pada pengukuran sudut kontak otomatis secara manual karena proses identifikasi tepi dan penghitungan sudut dilakukan secara otomatis.

3. Mendukung penelitian analisis citra sudut kontak otomatis.
4. Menambah referensi teknologi pengolahan citra untuk karakterisasi kebasahan material dan membuka peluang pengembangan sistem lebih lanjut.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan aplikasi perangkat lunak pengukur sudut kontak air otomatis berbasis Python yang mengintegrasikan Otsu Thresholding, Canny Edge, Hough Line Transform, dan Circle Fitting Curve dan Memvalidasi akurasi dan presisi aplikasi terhadap ImageJ sebagai metode pembandingan. Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Aplikasi *Water Contact Angle Analyzer* berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan mengintegrasikan tahapan *image preprocessing*, segmentasi menggunakan metode *Otsu Thresholding*, ekstraksi kontur, deteksi *baseline* menggunakan kombinasi *Canny Edge* dan *Hough Line Transform*, rekonstruksi profil tetesan menggunakan *Circle Fitting Curve*, penentuan titik kontak (*contact point*), penghitungan sudut kontak, serta klasifikasi tingkat kebasahan permukaan secara otomatis. Selain itu, aplikasi dilengkapi dengan antarmuka pengguna (*Graphical User Interface/GUI*) yang mampu melakukan analisis citra secara lebih mudah, cepat, dan terstruktur sehingga dapat digunakan sebagai alternatif perangkat lunak pengukuran sudut kontak air berbasis *computer vision*.
2. Hasil validasi menunjukkan bahwa aplikasi yang dikembangkan memiliki kinerja yang sangat baik dibandingkan dengan pengukuran menggunakan ImageJ sebagai metode referensi. Berdasarkan pengujian terhadap 24 sampel uji yang mencakup dua

kategori kebasahan, aplikasi memperoleh akurasi rata-rata sebesar 99,40% (rentang 94,65%–100%) terhadap ImageJ. Hasil pengujian presisi menunjukkan nilai presisi rata-rata sebesar 99,74%, yang menunjukkan bahwa hasil pengukuran berulang aplikasi memiliki konsistensi yang tinggi. Berdasarkan analisis jenis eror, penyimpangan hasil pengukuran aplikasi terhadap ImageJ didominasi oleh eror sistematis, bukan eror acak, dengan sumber utama berupa bias estimasi pada sudut kontak tinggi ($>120^\circ$) yang berkaitan dengan asumsi geometri *Circle Fitting*. Selain itu, aplikasi berhasil mengklasifikasikan seluruh sampel ke dalam kategori kebasahan yang tepat, dengan akurasi klasifikasi sebesar 100%.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa keterbatasan pada instrumentasi WCA Analyzer dan metode yang digunakan. Dengan demikian disarankan melakukan hal-hal sebagai berikut :

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambah variasi dataset citra, tidak hanya terbatas pada citra mikroskop Dino-Lite dengan perbesaran 220x, tetapi juga mencakup variasi perbesaran, jenis material, dan kondisi pencahayaan yang lebih beragam. Hal ini penting agar performa algoritma dapat diuji pada rentang kondisi pengambilan citra yang lebih luas.
2. Mengingat penyimpangan pengukuran cenderung meningkat pada sudut kontak tinggi (di atas 124°) akibat asumsi geometri lingkaran pada metode *Least Squares Circle Fitting*, penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan penerapan metode alternatif seperti *Low*

Bond Axisymmetric Drop Shape Analysis (LB-ADSA) yang berbasis persamaan Young-Laplace, sehingga estimasi sudut kontak pada tetesan dengan bentuk mendekati *spherical cap* dapat lebih akurat.

3. Proses segmentasi citra pada penelitian ini masih dipengaruhi oleh kondisi pencahayaan, kontras, refleksi permukaan tetesan, dan derau (*noise*). Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mengintegrasikan teknik prapemrosesan tambahan atau metode segmentasi yang lebih adaptif, agar kualitas kontur yang dihasilkan lebih stabil pada berbagai kondisi citra.
4. Aplikasi yang dikembangkan pada penelitian ini masih dirancang untuk berjalan pada sistem operasi Windows dengan *library* yang terbatas pada OpenCV, NumPy, SciPy, Matplotlib, dan PyQt5. Pengembangan lebih lanjut dapat diarahkan pada perluasan kompatibilitas platform (misalnya Linux atau berbasis web) serta penambahan fitur otomatisasi lain, seperti integrasi basis data hasil pengukuran atau ekspor laporan otomatis.
5. Validasi pada penelitian ini dilakukan dengan membandingkan hasil aplikasi terhadap aplikasi ImageJ sebagai referensi tunggal. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan validasi tambahan menggunakan metode atau instrumen pengukuran sudut kontak lain, seperti goniometer komersial, agar tingkat akurasi aplikasi dapat dibandingkan secara lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdou, M. A. (2022). Literature review: efficient deep neural networks techniques for medical image analysis. Dalam *Neural Computing and Applications* (Vol. 34, Nomor 8, hlm. 5791–5812). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-06960-9>
- Agyei, E., & Zhang Newby, B. (2026). Top-View Method as a Robust Alternative for Contact Angle Measurement. *Langmuir*, 42(10), 7060–7072. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5c04532>
- Akbari, R., Ambrosio, F., Berry, J. D., & Antonini, C. (2025). Wetting characterisation on complex surfaces by an automatic open-source tool: DropenVideo. *Journal of Colloid and Interface Science*, 678, 1075–1086. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.08.159>
- Akbari, R., & Antonini, C. (2021). Contact angle measurements: From existing methods to an open-source tool. Dalam *Advances in Colloid and Interface Science* (Vol. 294). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102470>
- Al Darwich, R., Babout, L., & Strzecha, K. (2022). An Edge Detection Method Based on Local Gradient Estimation: Application to High-Temperature Metallic Droplet Images. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/app12146976>
- Alyati, W. F., & Zakaria, W. (2015). Qadar in Classical and Modern Islamic Discourses: Commending a Futuristic Perspective. *International Journal of Islamic Thought*, 7. <https://doi.org/10.24035/ijit.7.2015.004>
- Andersen, N. K., & Taboryski, R. (2017). Drop shape analysis for determination of dynamic contact angles by double sided elliptical fitting method. *Measurement Science and Technology*, 28(4). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa5dcf>
- Atefi, E., Mann, J. A., & Tavana, H. (2013). A robust polynomial fitting approach for contact angle measurements. *Langmuir*, 29(19), 5677–5688. <https://doi.org/10.1021/la4002972>
- Bangare, S. L., Dubal, A., & Bangare, P. S. (2015). Reviewing Otsu's Method For Image Thresholding. Dalam *International Journal of*

- Bateni, A., Susnar, S. S., Amirfazli, A., & Neumann, A. W. (2003). A high-accuracy polynomial fitting approach to determine contact angles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 219(1–3), 215–231. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(03\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(03)00053-0)
- Beketov, G. V., & Shynkarenko, O. V. (2022). SURFACE WETTING AND CONTACT ANGLE: BASICS AND CHARACTERISATION. Dalam *Himia, Fizika ta Tehnologia Poverhni* (Vol. 13, Nomor 1, hlm. 3–35). Chuiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine. <https://doi.org/10.15407/HFTP13.01.003>
- Benke, A., Sonnenberg, J., Oelschlägel, K., Schneider, M., Lux, M., & Potthoff, A. (2022). Wettability after Artificial and Natural Weathering of Polyethylene Terephthalate. *Environments - MDPI*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/environments9110134>
- Biolè, D., & Bertola, V. (2015). A goniometric mask to measure contact angles from digital images of liquid drops. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 467, 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.10.060>
- Blunt, M. J. (2001). Constraints on contact angles for multiple phases in thermodynamic equilibrium. *Journal of Colloid and Interface Science*, 239(1), 281–282. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.7534>
- Bonometti, T., & Magnaudet, J. (2006). Transition from spherical cap to toroidal bubbles. *Physics of Fluids*, 18(5). <https://doi.org/10.1063/1.2196451>
- Bustacara-Medina, C., Florez-Valencia, L., & Carlos Diaz, L. (2020). Improved Canny Edge Detector Using Principal Curvatures. *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 8(4), 109. <https://doi.org/10.11648/j.jee.20200804.11>
- Cao, N., & Liu, Y. (2024a). High-Noise Grayscale Image Denoising Using an Improved Median Filter for the Adaptive Selection of a Threshold. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/app14020635>
- Cao, N., & Liu, Y. (2024b). High-Noise Grayscale Image Denoising Using an Improved Median Filter for the Adaptive Selection of a Threshold.

- Chalise, R., Niroula, A., Shrestha, P., Paudel, B., Subedi, D., & Khanal, R. (2023). A low-cost goniometer for contact angle measurements using drop image analysis: Development and validation. *AIP Advances*, 13(8). <https://doi.org/10.1063/5.0164668>
- Diana Julie M, D. (2023). Exploring the Paradigm Shift: Harnessing Data Analytics for Real - World Applications. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 12(6), 1467–1480. <https://doi.org/10.21275/sr23611121501>
- Dyer, R., & Chauhan, J. (2022). An exploratory study on the predominant programming paradigms in Python code. *ESEC/FSE 2022 - Proceedings of the 30th ACM Joint Meeting European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering*, 684–695. <https://doi.org/10.1145/3540250.3549158>
- Ezhilmaran, V., & Damodaram, R. (2021). Laser Surface Texturing on Nickel-Aluminium-Bronze Alloy for Improving the Hydrophobicity. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 8(1), 15–27. <https://doi.org/10.1007/s40516-020-00133-z>
- Fatar, F. M., & Abdullah, S. (2023). Faqih Muhammad Fatar et.al (Rethinking Qadha dan Qadar. *Jurnal Studi Agama dan Masyarakat*, 19(2), 128–139.
- Garnett, R., Huegerich, T., Chui, C., & He, W. (t.t.). *A New Framework for Removing Gaussian and Impulse Noises*.
- Gupta, A., Pandey, A., Kesarwani, H., Sharma, S., & Saxena, A. (2022). Automated determination of interfacial tension and contact angle using computer vision for oil field applications. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12(5), 1453–1461. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01398-6>
- Han, W., Shin, J., & Ho Shin, J. (2022). Low-cost, open-source contact angle analyzer using a mobile phone, commercial tripods and 3D printed parts. *HardwareX*, 12, e00327. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00327>

- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J. F., Wiebe, M., Peterson, P., ... Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. Dalam *Nature* (Vol. 585, Nomor 7825, hlm. 357–362). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Hasbi, H. (2023). *PERUBAHAN SOSIAL PADA MASYARAKAT DALAM PERSPEKTIF AL-QUR'AN*. 4(1), 2023. <https://journal.staijamaritar.ac.id/index.php/almaadaris>
- Hosain, M. M., & Sarker, D. (2025). Development of a Low-cost Surface Wettability Measurement Instrument. *IUBAT Review*, 8(1), 96–112. <https://doi.org/10.3329/iubatr.v8i1.83657>
- Huhtamäki, T., Tian, X., Korhonen, J. T., & Ras, R. H. A. (2018). Surface-wetting characterization using contact-angle measurements. *Nature Protocols*, 13(7), 1521–1538. <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0003-z>
- Hunter, J. D. (2007). *MATPLOTLIB: A 2D GRAPHICS ENVIRONMENT. SCIENTIFIC PROGRAMMING*.
- Iqbal, B., Iqbal, W., Khan, N., Mahmood, A., & Erradi, A. (2020). Canny edge detection and Hough transform for high resolution video streams using Hadoop and Spark. *Cluster Computing*, 23(1), 397–408. <https://doi.org/10.1007/s10586-019-02929-x>
- Jayanthi, J., & Maheswari, P. U. (2024). Comparative study: enhancing legibility of ancient Indian script images from diverse stone background structures using 34 different pre-processing methods. *Heritage Science*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01169-6>
- Kabir, H., & Garg, N. (2023). Machine learning enabled orthogonal camera goniometry for accurate and robust contact angle measurements. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28763-1>
- Kalbasi, M., & Nikmehr, H. (2020). Noise-Robust, Reconfigurable Canny Edge Detection and its Hardware Realization. *IEEE Access*, 8, 39934–39945. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976860>

- Kesarwani, H., Saxena, A., Mandal, A., & Sharma, S. (2021). Anionic/nonionic surfactant mixture for enhanced oil recovery through the investigation of adsorption, interfacial, rheological, and rock wetting characteristics. *Energy and Fuels*, 35(4), 3065–3078. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03767>
- Khambali, K., Mahmud, M., & Suhartini, A. (2022). THE CONCEPT OF GOD’S ABILITY (QUDRATULLAH) IN ISLAMIC EDUCATION. *Ta dib Jurnal Pendidikan Islam*, 11(2), 107–116. <https://doi.org/10.29313/tjpi.v11i2.10068>
- Kirk, S., Strobel, M., Lyons, C. S., & Janis, S. (2019). A statistical comparison of contact angle measurement methods. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 33(16), 1758–1769. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1611400>
- Kovalchuk, N. M., & Simmons, M. J. H. (2021). Surfactant-mediated wetting and spreading: Recent advances and applications. Dalam *Current Opinion in Colloid and Interface Science* (Vol. 51). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.07.004>
- Lamour, G., Hamraoui, A., Buvailo, A., Xing, Y., Keuleyan, S., Prakash, V., Eftekhari-Bafrooei, A., & Borguet, E. (2010). Contact angle measurements using a simplified experimental setup. *Journal of Chemical Education*, 87(12), 1403–1407. <https://doi.org/10.1021/ed100468u>
- Lebedev-Stepanov, P., & Vlasov, K. (2013). Simulation of self-assembly in an evaporating droplet of colloidal solution by dissipative particle dynamics. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 432, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.05.012>
- Liu, K., Kang, X., & Xiong, H. (2017). *An Image Edge Detection Algorithm Based on Improved Canny*.
- Liu, K., Vuckovac, M., Latikka, M., Huhtamäki, T., & Ras, R. H. A. (2019). Improving surface-wetting characterization. Dalam *Science* (Vol. 363, Nomor 6432, hlm. 1147–1148). American Association for the Advancement of Science. <https://doi.org/10.1126/science.aav5388>
- Magos, I., & Balan, C. (2021, Maret 25). Contact Angles on Spherical Hydrophilic Surfaces. *12th International Symposium on Advanced*

Topics in Electrical Engineering, ATEE 2021.
<https://doi.org/10.1109/ATEE52255.2021.9425277>

- Majid Mohammed, I., & Ashidi Mat Isa, N. (2025). Contrast Limited Adaptive Local Histogram Equalization Method for Poor Contrast Image Enhancement. *IEEE Access*, 13, 62600–62632. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3558506>
- Makandar, A., & Kaman, S. (2023a). Analysis of Different Filter Techniques for Image Denoising. Dalam *International Journal of Computer Applications* (Vol. 184, Nomor 52).
- Makandar, A., & Kaman, S. (2023b). Analysis of Different Filter Techniques for Image Denoising. Dalam *International Journal of Computer Applications* (Vol. 184, Nomor 52).
- Masood, M. K. K., Nava Baro, E., & Otero Roth, P. (2025). A Novel Intensity-Corrected Blue Channel Compensation and Edge-Preserving Contrast Enhancement Using Laplace Filter and Sigmoid Function for Sand-Dust Image Enhancement. *IEEE Access*, 13, 43127–43144. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3548972>
- Maulana, A., Auliatunnajah, F., Rosidin, N., Ramadien Rizki Darmawan, M., & Rosyani, P. (2024). Implementasi OpenCV dengan Metode Image Thresholding pada Gambar. *Jurnal Artificial Inteligent dan Sistem Penunjang Keputusan*, 2(1). <https://jurnalmahasiswa.com/index.php/aidanspk>
- Mayangsari, A. D., & Agung, I. W. P. (2024). A Systematic Literature Review: Performance Comparison of Edge Detection Operators in Medical Images. *Jurnal ELTIKOM*, 8(1), 9–25. <https://doi.org/10.31961/eltikom.v8i1.1012>
- Meng, G., Zhang, Y., Jiang, B., & Guo, H. (2026). Dynamics of Surface Processes: Impact of Adiabatic and Nonadiabatic Energy Dissipation. *Annual Review of Physical Chemistry*, 58, 24. <https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-082624>
- Nnolim, U. A. (2020). Automated crack segmentation via saturation channel thresholding, area classification and fusion of modified level set segmentation with Canny edge detection. *Heliyon*, 6(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05748>

- Novita Sari, R., & Anbarsanti, N. (t.t.). *RANCANG BANGUN APLIKASI FILTER NEIGHBORHOOD PROCESSING DAN NOISE REDUCTION UNTUK IMAGE PROCESSING MENGGUNAKAN MATLAB* (Nomor 1).
- Onyedinma Ebele G., Asogwa Doris C., & Onwumbiko Joy N. (2025). Exploring the Effectiveness of Sobel, Canny, and Prewitt Edge Detection Algorithms on Digital Images. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 15(1), 1722–1730. <https://doi.org/10.30574/wjaets.2025.15.1.0346>
- Orella, M. J., Leonard, M. E., Román-Leshkov, Y., & Brushett, F. R. (2021). High-throughput analysis of contact angle goniometry data using DropPy. *SoftwareX*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100665>
- Parreidt, T. S., Schmid, M., & Hauser, C. (2017). Validation of a novel technique and evaluation of the surface free energy of food. *Foods*, 6(4), 1–14. <https://doi.org/10.3390/foods6040031>
- Pham, D.-S. (2015). *2015 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA): Adelaide, Australia, 23-25 November 2015*. IEEE.
- Ponomar, M., Krasnyuk, E., Butylskii, D., Nikonenko, V., Wang, Y., Jiang, C., Xu, T., & Pismenskaya, N. (2022). Sessile Drop Method: Critical Analysis and Optimization for Measuring the Contact Angle of an Ion-Exchange Membrane Surface. *Membranes*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/membranes12080765>
- Putro, M. D., Nguyen, D. L., & Jo, K. H. (2020). A Dual Attention Module for Real-time Facial Expression Recognition. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2020-Octob, 411–416. <https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254805>
- Quetzeri-Santiago, M. A., Castrejón-Pita, J. R., & Castrejón-Pita, A. A. (2020). On the analysis of the contact angle for impacting droplets using a polynomial fitting approach. *Experiments in Fluids*, 61(6). <https://doi.org/10.1007/s00348-020-02971-1>
- Rabbani, A., Sun, C., Babaei, M., Niasar, V. J., Armstrong, R. T., & Mostaghimi, P. (2023). DeepAngle: Fast calculation of contact angles in tomography images using deep learning. *Geoenergy Science and Engineering*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211807>

- Radillah, T., Veza, O., & Sumijan, S. (2024). COMPARATIVE ANALYSIS OF CANNY, SOBEL, PREWITT AND ROBERTS EDGE DETECTION OPERATORS ON EYE IRIS IMAGES. *JITK (Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Komputer)*, 10(1), 83–90. <https://doi.org/10.33480/jitk.v10i1.5062>
- Ruvimova, A., Kim, J., Fritz, T., Hancock, M., & Shepherd, D. C. (2020, April 21). “transport Me Away”: Fostering Flow in Open Offices through Virtual Reality. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376724>
- Sakugawa, P. M., Jaculli, M. A., Santos, R. M. G., Camargo, G., Barreto, C. E. A. G., & Pedrini, H. (2020). Methodology for obtaining contact angles in rock sample images using image processing and polynomial fitting techniques. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 10(4), 1359–1366. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00851-2>
- Sankar, A., & Sridhar, R. (2017). *Gene Interactions and Influences Identification for Diabetes from Bio-Medical Literature*. IEEE.
- Sekehravani, E. A., Babulak, E., & Masoodi, M. (2020). Implementing canny edge detection algorithm for noisy image. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 9(4), 1404–1410. <https://doi.org/10.11591/eei.v9i4.1837>
- Shaw, D., Liang, R., Zheng, T., Qi, J., & Berry, J. (2024). *Accurate and robust static hydrophobic contact angle measurements using machine learning*. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2024-6nhr1>
- Shi, Z., Chen, Y., Gavves, E., Mettes, P., & Snoek, C. G. M. (2021). Unsharp Mask Guided Filtering. *IEEE Transactions on Image Processing*, 30, 7472–7485. <https://doi.org/10.1109/TIP.2021.3106812>
- Shin, S., Seo, J., Han, H., Kang, S., Kim, H., & Lee, T. (2016). Bio-inspired extreme wetting surfaces for biomedical applications. *Dalam Materials* (Vol. 9, Nomor 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma9020116>
- Si, Y., Yu, C., Dong, Z., & Jiang, L. (2018). Wetting and spreading: Fundamental theories to cutting-edge applications. *Dalam Current Opinion in Colloid and Interface Science* (Vol. 36, hlm. 10–19). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2017.12.006>

- Stalder, A. F., Melchior, T., Müller, M., Sage, D., Blu, T., & Unser, M. (2010). Low-bond axisymmetric drop shape analysis for surface tension and contact angle measurements of sessile drops. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 364(1–3), 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.04.040>
- Stimper, V., Bauer, S., Ernstorfer, R., Schölkopf, B., & Xian, R. P. (2019). Multidimensional Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization. *IEEE Access*, 7, 165437–165447. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2952899>
- Stride3D Documentation. (2023). *Gamma correction*. <https://doc.stride3d.net/latest/en/manual/graphics/post-effects/color-transforms/gamma-correction.html>
- Summerfield, M. (2008). *Rapid GUI Programming with Python and Qt*. Prentice Hall Professional Technical Reference.
- Sun, L., Guo, J., Chen, H., Zhang, D., Shang, L., Zhang, B., & Zhao, Y. (2021). Tailoring Materials with Specific Wettability in Biomedical Engineering. Dalam *Advanced Science* (Vol. 8, Nomor 19). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/advs.202100126>
- Supiyandi Supiyandi, Adinda Fita Hidayah, Luthfie Budie, Nurhalijah Berutu, & Fakhita Fahraini. (2024). Pengenalan Gambar Dasar Menggunakan Python dan OpenCV. *Jurnal Sistem Informasi dan Ilmu Komputer*, 2(4), 52–61. <https://doi.org/10.59581/jusiik-widyakarya.v2i4.4200>
- Syafwanalif Moelya, M., Sari Ramadhan, P., & Gilang Suryanata, M. (2024). Perbandingan Metode Canny, Sobel, Dan Laplacian of Gaussian Dalam Mendeteksi Tepi Citra Objek Bergerak. 3(4), 450–460. <https://ojs.trigunadharma.ac.id/index.php/jsi>
- Syahrul, A., Yusuf, M., & Haddade, H. (2025). *Destiny (Al-Qadr) in the Qur'an: An Epistemological and Theological Exploration of Divine Decree and Human Responsibility*. <https://www.google.com/search?q=term+qadr>
- Teshima, H., Kusudo, H., Bistafa, C., & Yamaguchi, Y. (2022). Quantifying interfacial tensions of surface nanobubbles: How far can Young's equation explain? *Nanoscale*, 14(6), 2446–2455. <https://doi.org/10.1039/d1nr07428h>

- Thaker, N., Chandaben, S., Patel, M., & Shukla, A. (2020). Python as Multi Paradigm Programming Language. Dalam *International Journal of Computer Applications* (Vol. 177, Nomor 31).
- Thalib, Muh. D. (2015). *TAKDIR DAN SUNNATULLAH*(Suatu Kajian Tafsir Maudhu'i).
- Thomsen, F. (2008). *Practical contact angle measurement (4) Measuring with method-but with which one?* <http://www.kruss.de>
- Usman, A., & Khairani, M. (2024). Implementasi Noise Removal Dan Image Enhancement Pada Citra Digital Menggunakan Metode Adaptive Median Filter Implementation Of Noise Removal and Image Enhancement in Digital Images Using the Adaptive Median Filter Method. Dalam *Januari* (Vol. 2024, Nomor 1). <https://jurnal.unity-academy.sch.id/index.php/jirsi/index>
- Venkata Mahesh Babu Batta. (2024). Image Processing using Python. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 575–579. <https://doi.org/10.48175/ijarsct-17499>
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., ... Vázquez-Baeza, Y. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Vuckovac, M., Latikka, M., Liu, K., Huhtamäki, T., & Ras, R. H. A. (2019a). Uncertainties in contact angle goniometry. *Soft Matter*, 15(35), 7089–7096. <https://doi.org/10.1039/c9sm01221d>
- Vuckovac, M., Latikka, M., Liu, K., Huhtamäki, T., & Ras, R. H. A. (2019b). Uncertainties in contact angle goniometry. *Soft Matter*, 15(35), 7089–7096. <https://doi.org/10.1039/c9sm01221d>
- Vuckovac, M., Latikka, M., Liu, K., Huhtamäki, T., & Ras, R. H. A. (2019c). Uncertainties in contact angle goniometry. *Soft Matter*, 15(35), 7089–7096. <https://doi.org/10.1039/c9sm01221d>
- Wang, D., Yin, J., Tang, C., Cheng, X., & Ge, B. (2020). Color Edge Detection Using the Normalization Anisotropic Gaussian Kernel and

Multichannel Fusion. *IEEE Access*, 8, 228277–228288.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3044341>

Williams, H. (2023). Superhydrophobic Sand Repels Water. *The Physics Teacher*, 61(2), 138–139. <https://doi.org/10.1119/5.0065235>

Woodward, R. P. (t.t.). *Contact Angle Measurements Using the Drop Shape Method*.

Yamaguchi, Y., Kusudo, H., Surblys, D., Omori, T., & Kikugawa, G. (2019). Interpretation of Young's equation for a liquid droplet on a flat and smooth solid surface: Mechanical and thermodynamic routes with a simple Lennard-Jones liquid. *Journal of Chemical Physics*, 150(4).
<https://doi.org/10.1063/1.5053881>

Yariv, E. (2022). Shape of sessile drops at small contact angles. *Journal of Fluid Mechanics*, 950. <https://doi.org/10.1017/jfm.2022.851>

Ye, W., & Ma, K. K. (2018). Blurriness-Guided Unsharp Masking. *IEEE Transactions on Image Processing*, 27(9), 4465–4477.
<https://doi.org/10.1109/TIP.2018.2838660>

Yildirim Erbil, H. (2021). Dependency of contact angles on three-phase contact line: A review. *Colloids and Interfaces*, 5(1).
<https://doi.org/10.3390/colloids5010008>

Zhao, T., & Jiang, L. (2018). Contact angle measurement of natural materials. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 161, 324–330.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.10.056>

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA