

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Laboratorium farmasi, khususnya laboratorium teknologi sediaan padat, merupakan fasilitas penting dalam proses pendidikan dan penelitian kefarmasian. Laboratorium ini digunakan untuk berbagai aktivitas praktikum, seperti penimbangan bahan aktif, pencampuran serbuk, pencetakan tablet, hingga pengujian mutu sediaan obat. Aktivitas tersebut memiliki tingkat risiko yang relatif tinggi karena melibatkan paparan bahan kimia, debu farmasi, serta tuntutan ketelitian tinggi dalam menjaga dosis dan mutu produk obat [1].

Penggunaan APD bertujuan untuk mencegah kontak langsung antara bahan berbahaya dengan kulit, mata, maupun saluran pernapasan, sehingga dapat menurunkan risiko cedera dan gangguan kesehatan akibat paparan bahan kimia (Zaini et al., 2021; Salvi, 2022; Bartkowiak et al., 2021). Berdasarkan laporan *Laboratory Biosafety Manual* edisi terbaru, WHO menyatakan bahwa lebih dari 60% insiden keselamatan kerja di laboratorium farmasi dan biomedis disebabkan oleh ketidakpatuhan prosedur dasar keselamatan, termasuk penggunaan APD dan pengendalian lingkungan kerja [1]. Temuan ini menunjukkan bahwa risiko kecelakaan dan kontaminasi masih menjadi permasalahan nyata di laboratorium pendidikan maupun penelitian. Fakta mencatat, pada tanggal 16 Maret 2015 telah terjadi kecelakaan kerja di laboratorium Kimia Fakultas Farmasi Universitas Indonesia, yaitu terjadinya ledakan labu destilasi saat praktikum sedang dilaksanakan. Tidak sedikit mahasiswa yang harus dirawat akibat pecahan labu destilasi tersebut [6].

Salah satu permasalahan utama yang masih sering ditemukan adalah ketidakpatuhan penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) oleh mahasiswa sebelum memasuki laboratorium. APD seperti jas laboratorium, masker, dan sarung tangan sering kali tidak diperiksa secara sistematis. Padahal, pedoman *Good Manufacturing Practice* (GMP) WHO menegaskan bahwa penggunaan APD merupakan persyaratan dasar untuk mencegah kontaminasi silang dan melindungi personel dari paparan bahan berbahaya [2]. WHO juga melaporkan bahwa

ketidakpatuhan penggunaan APD dapat meningkatkan risiko kontaminasi produk farmasi hingga 30–40%, khususnya pada proses sediaan padat [2].

Pada penelitian yang dilakukan dengan desain observasional analitik dengan pendekatan cross-sectional, dengan populasi meliputi mahasiswa Program Studi Farmasi semester III kelas A dan B. Teknik pengambilan sampel yang digunakan adalah total sampling dengan jumlah responden sebanyak 99 orang. Penelitian dilaksanakan pada 13–30 Oktober 2025 di Laboratorium Farmasi STIKES X Palembang dan data yang diperoleh dianalisis menggunakan uji Chi-Square [33].

Tabel 1. 1 Analisis Variabel Kepatuhan Penggunaan APD

No	Variabel	Frekuensi (f)	Persentase (%)
1.	Kepatuhan Penggunaan Alat Pelindung diri		
	• Patuh	42	42,4
	• Tidak Patuh	57	57,6
2.	Pengetahuan		
	• Baik	38	38,4
	• Kurang Baik	61	61,6
3.	Sikap		
	• Positif	40	40,4
	• Negatif	59	59,6

Berdasarkan Tabel 1.1, dari total 99 responden, sebanyak 57 orang (57,6%) diketahui tidak patuh dalam penggunaan Alat Pelindung Diri (APD), sementara hanya 42 orang (42,4%) yang menggunakan APD sesuai dengan ketentuan. Dari aspek pengetahuan, 61 responden (61,6%) memiliki tingkat pengetahuan yang kurang memadai mengenai penggunaan APD, sedangkan 40 responden (40,4%) memiliki pengetahuan yang memadai. Selain itu, dari sisi sikap, 59 responden (59,6%) menunjukkan sikap negatif terhadap penggunaan APD, sementara 40 responden (40,4%) memiliki sikap positif. Temuan ini mengindikasikan bahwa rendahnya kepatuhan penggunaan APD di lingkungan laboratorium pendidikan masih dipengaruhi oleh faktor pengetahuan dan sikap praktikan, sehingga diperlukan upaya penguatan pengawasan dan pengendalian kepatuhan secara berkelanjutan [33].

Selain bahaya fisik, kontak dengan bahan kimia melalui penyerapan kulit ataupun pernafasan juga merupakan potensi bahaya utama. Reaksi tubuh terhadap bahan kimia dapat terjadi secara akut (konsentrasi tinggi dalam waktu pendek) yang berakibat iritasi hingga fatal, maupun secara kronis (jumlah sedikit dalam waktu lama) yang kerusakannya baru dirasakan setelah jangka panjang. Bahan kimia yang terhirup dapat masuk ke peredaran darah dan menumpuk di organ tubuh, menyebabkan kerusakan fungsi organ di kemudian hari [6].

Risiko paparan berbahaya tersebut sebenarnya dapat dimitigasi secara efektif melalui penggunaan APD. Berdasarkan analisis statistik *chi square* pada penelitian yang sama, ditemukan fakta bahwa kedisiplinan penggunaan APD merupakan satu-satunya variabel yang memiliki hubungan signifikan dengan kejadian kecelakaan kerja (*p value* 0,033), berbeda dengan variabel tingkat pengetahuan maupun SOP yang tidak menunjukkan korelasi langsung. Namun, kendala utama di lapangan adalah faktor kelalaian manusia; tercatat 50% responden mengaku kadang bekerja tanpa APD karena lupa, dan 33,3% tidak selalu menggunakan APD lengkap meski sudah ditegur. Tingginya faktor *human error* inilah yang mendasari urgensi pengembangan sistem pendeteksi dan monitoring kelengkapan APD otomatis, guna memastikan kepatuhan praktikan secara *real-time* sebelum bahaya terjadi [6].

Tabel 1. 2 Hubungan Faktor Pengetahuan dan Sikap dengan Kepatuhan

No	Variabel	Kepatuhan responden				Total		OR (95% CI)	P-Value
		Patuh		Tidak patuh					
		<i>f</i>	%	<i>f</i>	%	<i>f</i>	%		
1.	Pengetahuan								
	• Baik	20	52,6	18	47,4	38	100	3,77	0,003
	• Kurang	22	36,1	39	63,9	61	100		
2.	Sikap								
	• Positif	23	57,5	17	42,5	40	100	4,30	0,002
	• Negatif	19	32,2	40	67,8	59	100		

Berdasarkan Tabel 1.2, hasil analisis menunjukkan bahwa tingkat pengetahuan dan sikap memiliki hubungan yang signifikan terhadap kepatuhan penggunaan APD, yang secara langsung berdampak pada tingkat perlindungan nyata praktikan di laboratorium. Sebanyak 20 responden (52,6%) dengan pengetahuan yang baik terbukti patuh menggunakan APD secara benar, sedangkan 18 responden (47,4%) meskipun memiliki pengetahuan tinggi, tidak menerapkan penggunaan APD secara

konsisten, sehingga perlindungan terhadap risiko paparan bahan kimia belum optimal. Hasil uji Chi-Square menunjukkan bahwa pengetahuan berpengaruh signifikan terhadap kepatuhan penggunaan APD ($p = 0,003$) [33].

Selain itu, dari 40 responden yang memiliki sikap positif, sebanyak 23 orang (57,5%) secara konsisten mematuhi penggunaan APD, sementara 17 orang (42,5%) masih menunjukkan ketidakpatuhan. Uji statistik menunjukkan bahwa sikap responden juga berhubungan signifikan dengan kepatuhan penggunaan APD ($p = 0,002$). Temuan ini menegaskan bahwa perlindungan nyata terhadap risiko kerja di laboratorium tidak hanya bergantung pada pengetahuan atau sikap semata, tetapi sangat ditentukan oleh kepatuhan aktual dalam penggunaan APD, sehingga diperlukan mekanisme pengawasan dan pengendalian yang mampu memastikan penggunaan APD secara konsisten selama kegiatan praktikum berlangsung [33].

Meskipun secara prinsip penggunaan Alat Pelindung Diri tidak menghilangkan sumber bahaya itu sendiri, namun penggunaannya sangat krusial untuk menghindarkan pekerja dari cedera fisik akibat paparan bahaya tersebut. Dalam konsep hierarki pengendalian bahaya (*hierarchy of hazards control*), APD menempati posisi sebagai pertahanan terakhir. Oleh karena itu, selain ketersediaan alat, diperlukan kebijakan dan pengawasan ketat dari pengelola laboratorium untuk mengantisipasi kelalaian mahasiswa yang tidak membawa atau tidak mengenakan APD saat hendak melakukan pengujian.

Permasalahan lain yang signifikan adalah praktikan yang tetap mengikuti praktikum dalam kondisi kesehatan tidak optimal, seperti demam dan flu. Menurut *Biosafety in Microbiological and Biomedical Laboratories* (BMBL), kondisi kesehatan personel yang tidak terkontrol dapat menjadi sumber kontaminasi biologis dan meningkatkan risiko pencemaran mikroba terhadap lingkungan kerja dan produk farmasi [3]. Urgensi penerapan sistem skrining otomatis di laboratorium didukung oleh studi Critz et al. (2020). Hasilnya dapat dilihat pada tabel 1.2 dibawah, di mana ia menemukan bahwa 69,5% mahasiswa rumpun kesehatan tetap menghadiri sesi praktikum klinis meskipun sedang sakit. Fenomena ini terjadi bukan karena kurangnya pengetahuan—mengingat 99% responden sadar bahwa tindakan tersebut membahayakan keselamatan —melainkan akibat tekanan akademik dan sulitnya prosedur penggantian jadwal (inhal). Data ini menegaskan

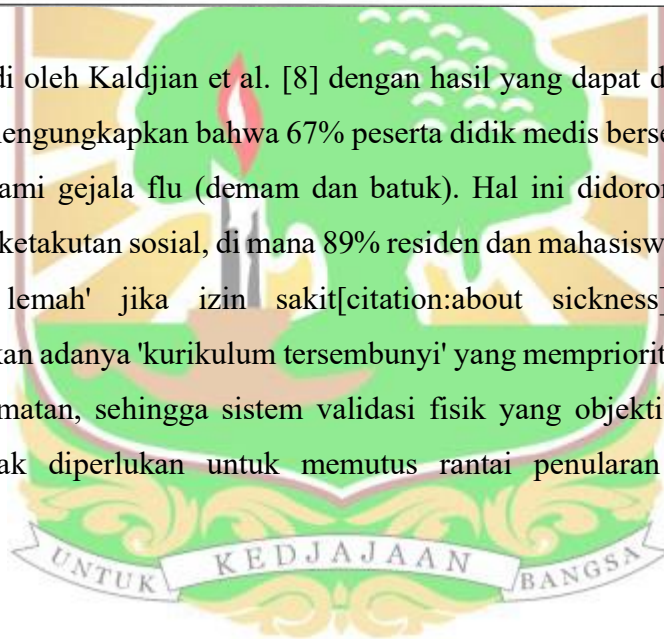
bahwa kepatuhan protokol kesehatan tidak dapat diserahkan sepenuhnya pada kesadaran individu (self-report), melainkan memerlukan sistem validasi fisik yang objektif dan terintegrasi[7].

Tabel 1. 3 Hasil Studi oleh Critz et al. (2020)

	Honolulu	Seoul	Tokyo	P
Do not want to let classmates down.	2.48	1.86	1.97	.001
Do not want to let instructor down.	3.27	2.22	3.25	<.001
Instructor expects me to attend.	3.21	2.23	3.76	<.001
Instructor will not believe I am sick.	3.23	3.83	2.29	<.001
No way to make up missed lecture time.	4.26	4.40	3.92	.002
I will miss critical information.	4.70	4.47	4.20	<.001
I may fail the next examination or the entire class if I do not attend.	4.36	4.25	4.15	.014
Worried I may not pass the final national or state licensing examination if I do not attend.	3.82	2.77	3.14	<.001
I come because my classmates come to class while sick.	2.28	3.41	2.37	<.001

Scale: 1 = low to 5 = high.

Selain itu Studi oleh Kaldjian et al. [8] dengan hasil yang dapat dilihat pada tabel 1.2 dibawah mengungkapkan bahwa 67% peserta didik medis bersedia tetap masuk meski mengalami gejala flu (demam dan batuk). Hal ini didorong oleh tekanan akademik dan ketakutan sosial, di mana 89% residen dan mahasiswa takut dianggap 'malas atau lemah' jika izin sakit[citation:about sickness]. Temuan ini mengindikasikan adanya 'kurikulum tersembunyi' yang memprioritaskan kehadiran di atas keselamatan, sehingga sistem validasi fisik yang objektif (seperti Smart Station) mutlak diperlukan untuk memutus rantai penularan di lingkungan laboratorium.



Tabel 1. 4 Hasil Studi oleh Kaldijan et al. (2019)

	Agree or Strongly Agree		
	Students	Residents	Faculty
<i>As a medical student, when feeling sick with what might be an infectious condition ...</i>			
I would leave the decision to come into work up to my superior.	33%	–	–
I would come into work to avoid a negative evaluation by my superior.	78%	–	–
I would come into work to avoid having to make up work.	64%	–	–
My decision to come into work would depend on the length of my rotation (i.e. I would be more likely to remain at home during a 6-week rotation as opposed to a 2-week rotation).	82%	–	–
<i>As a resident, when feeling sick with what might be an infectious condition ...</i>			
I would leave the decision to come into work up to my superior.	–	37%	–
I would come into work to avoid a negative evaluation by my superior.	–	74%	–
<i>As a resident ...</i>			
I would negatively evaluate a medical student for remaining at home when sick.	–	11%	–
I would view a medical student as lazy or weak if he or she called in sick.	–	5%	–
<i>As an attending (faculty) physician ...</i>			
I would negatively evaluate a medical student or resident for remaining at home when sick with what might be an infectious condition.	–	–	0%
I would view a medical student or resident as lazy or weak if he or she called in sick.	–	–	3%

Dalam konteks laboratorium farmasi, kontaminasi biologis dapat berdampak langsung terhadap keamanan dan mutu sediaan obat, sehingga pengendalian kondisi kesehatan personel menjadi aspek yang sangat penting [3].

Selain faktor manusia, kondisi lingkungan laboratorium, khususnya suhu dan kualitas udara, juga menjadi tantangan krusial. Laboratorium sediaan padat idealnya memiliki suhu dan sirkulasi udara yang terkontrol untuk menjaga stabilitas bahan aktif dan mencegah paparan debu farmasi. WHO dan standar lingkungan terkendali menyebutkan bahwa fluktuasi suhu serta ventilasi yang tidak memadai dapat menyebabkan degradasi bahan obat dan meningkatkan risiko gangguan pernapasan pada praktikan [2], [4]. Standar ISO juga merekomendasikan pemantauan kualitas udara secara berkelanjutan pada fasilitas farmasi untuk menjamin keselamatan personel dan mutu produk [4].

Berdasarkan Peraturan BPOM No 37 Tahun 2018 butir 5.194, Data pemantauan suhu hendaklah tersedia untuk dievaluasi. Selain itu, pemetaan suhu hendaklah dapat menunjukkan suhu sesuai dengan batas spesifikasi di semua area fasilitas penyimpanan. Berdasarkan hasil survey yang dilakukan pada ruang granulasi di Laboratorium Teknologi Sediaan Padat Fakultas Farmasi Universitas Andalas, belum ada terdapat sistem untuk pemantauan suhu, kelembapan, dan kualitas udara di dalam ruangan sehingga belum memenuhi standar yang ditetapkan oleh BPOM juga

Berdasarkan studi “Perancangan Sistem Tata Udara pada Instalasi Ruang Farmasi RSAB Harapan Kita Jakarta” menunjukkan bahwa pengendalian suhu, kelembaban, dan kualitas udara merupakan faktor kritis dalam menjaga tingkat kebersihan ruang produksi farmasi. Hasil studi menegaskan bahwa ketidaksesuaian parameter lingkungan terhadap standar yang ditetapkan dapat meningkatkan risiko kontaminasi partikulat dan mikrobiologis, terutama pada ruang dengan tingkat kebersihan tinggi. Oleh karena itu, penerapan sistem yang dapat memantau tata udara dalam ruangan sangat diperlukan demi menjamin mutu dan keamanan produk farmasi. Berdasarkan studi tersebut diberikan rekomendasi parameter pengkondisian udara [53]


Tabel 1. 5 Hasil Studi oleh Markus et al. (2021)

Rekomendasi Sistem Tata Udara Untuk Kelas Kebersihan

Kelas Kebersihan	Ventilasi					Keterangan
	Bagian dari Bangunan Sesuai Kelompok Kegiatan & Tingkat Kebersihan	Suhu (°C)	Kelembaban Nisbi (%)	Efisiensi Saringan Udara Akhir (Sesuai Kode EN 779 & EN 1822)***	Pertukaran Udara per Jam	
A	Di bawah Aliran udara Laminar (LAF)	16 - 25	45 - 55	H14 (99,995 %)	LAF dgn kecepatan udara 0,36–0,54 m/det.	• Pengalihan dan pengalihan snptlan • Pengalihan adap nasa, lngkti, data partukla lnggail
B	Ruang Steril	16 - 25	45 - 55	H14 (99,995 %)	Aliran udara turbulen dgn pertukaran udara min. 20 x	• Lingkungan letar baklerug zona, keles & tata pengalihan & pengalihan sxptia
C	Ruang Steril	16 - 25	45 - 55	H13 (99,95 %)	Min. 20 x	• Pembagian steril tabilla strup, • Pengalihan prod&lk parenteral
D	Bersih	20 - 27	40 - 60	• F8 (75%) dan 90% ASHRAE 52/76 (single pass) • H13 (99,95%) bila resikcalati dir shir make-up air 10-12% frest air)	Min. 20 x	• Pembagian ubat sterililagan steril

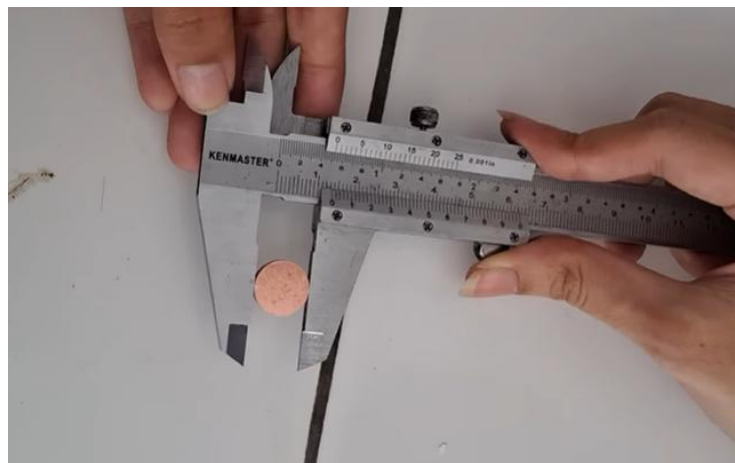
*** EN 779 (Filter ASHRAE 52/76). Standar Eropa untuk efisiensi penyaringan udara untuk filter kasar – sedang / tinggi (s: singai; medium, high efficiency filters).

*** EN 1822: Standar Eropa untuk saringan udara partikulat efisiensi tinggi tinggi (HEPA/ULPA).

Selain aspek keselamatan kerja (K3) dan pengendalian lingkungan, aspek penjaminan mutu (Quality Assurance) produk juga menjadi indikator vital dalam keberhasilan praktikum teknologi sediaan padat. Di industri farmasi, kepatuhan terhadap prosedur K3 berjalan beriringan dengan ketatnya kontrol kualitas produk.

Namun, dalam proses praktikum saat ini, validasi mutu fisik tablet khususnya pengukuran dimensi dan bobot—masih dilakukan secara manual. Metode konvensional ini menjadi permasalahan tersendiri yang setara urgensinya dengan

isu kepatuhan APD, karena sangat bergantung pada ketelitian manusia. Literatur farmasetika modern menegaskan bahwa variasi bobot dan ukuran tablet merupakan parameter kritis dalam evaluasi mutu sediaan padat, karena berpengaruh langsung terhadap keseragaman dosis dan efektivitas obat [5]. Kesalahan kecil dalam pengukuran dapat menyebabkan penyimpangan dosis yang signifikan dan berpotensi menimbulkan kesalahan fatal apabila diterapkan dalam skala industri [5].



Gambar 1. 1 Jangka Sorong

Pengukuran dimensi tablet pada kegiatan praktikum farmasi umumnya dilakukan secara manual menggunakan jangka sorong (caliper), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.1. Metode ini digunakan untuk menentukan diameter dan ketebalan tablet sebagai bagian dari evaluasi mutu sediaan padat sesuai dengan ketentuan farmakope. Proses pengukuran dilakukan dengan meletakkan tablet di antara rahang caliper dan membaca nilai skala secara visual oleh operator.

Dalam praktiknya, pengukuran manual menggunakan caliper memerlukan ketelitian tinggi dari operator, mulai dari penempatan tablet, penjajaran alat ukur, hingga pembacaan skala. Faktor seperti posisi pengukuran, sudut pandang pembacaan, serta tekanan yang diberikan saat menjepit tablet dapat memengaruhi hasil pengukuran, terutama pada objek berdimensi kecil seperti tablet farmasi.

Ketergantungan terhadap faktor manusia dalam proses pengukuran tersebut berpotensi menimbulkan variasi hasil antar pengukuran maupun antar operator.

Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun metode manual masih banyak digunakan dalam kegiatan praktikum, diperlukan pendekatan pengukuran yang lebih terotomasi guna meningkatkan efektivitas operasional laboratorium, sehingga evaluasi mutu tablet dapat dilakukan secara cepat tanpa membebani durasi waktu praktikum.

Berdasarkan permasalahan tersebut, dapat disimpulkan bahwa laboratorium teknologi sediaan padat membutuhkan pendekatan berbasis teknologi terintegrasi. Sistem ini tidak hanya dirancang untuk melindungi keselamatan praktikan (Human Safety), tetapi juga menjamin validitas produk yang dihasilkan (Product Quality).

Integrasi sistem pemeriksaan APD, pemantauan kondisi kesehatan, monitoring lingkungan, serta otomasi pengukuran dimensi tablet merupakan solusi holistik. Pendekatan *all-in-one* ini relevan untuk meminimalkan faktor *human error* yang menjadi akar penyebab utama kecelakaan kerja maupun penyimpangan data mutu obat di laboratorium pendidikan."

Implementasi sistem monitoring cerdas ini tidak hanya berfungsi untuk meminimalkan *human error* dalam pengawasan K3 dan pengukuran mutu, tetapi juga berkontribusi dalam membangun budaya keselamatan (*safety culture*) dan meningkatkan kualitas pembelajaran serta riset mahasiswa. Dalam jangka panjang, sistem ini mendukung peningkatan mutu sumber daya manusia yang siap menghadapi tantangan industri farmasi global.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Laboratorium Teknologi Sediaan Padat merupakan unit fasilitas pendidikan dan penelitian vital di bawah naungan Fakultas Farmasi, Universitas Andalas. Laboratorium ini beroperasi secara aktif pada hari kerja, mulai pukul 07.30 hingga 16.00 WIB, untuk menunjang kegiatan praktikum mahasiswa serta penelitian dosen dalam pengembangan formulasi obat. Secara fisik, laboratorium ini terbagi menjadi lima zona fungsional utama untuk menjamin alur kerja yang sesuai dengan prinsip *Good Laboratory Practice* (GLP).

Tata letak ruangan dirancang untuk memfasilitasi berbagai tahapan produksi sediaan farmasi. Bagian sentral laboratorium berfungsi sebagai Ruang Utama yang

mengakomodasi kegiatan diskusi, evaluasi awal, dan pengujian fisik sediaan (seperti uji ketahanan dan pengukuran dimensi obat). Area ini dilengkapi dengan dua unit meja kerja panjang berkapasitas 25 kursi yang menjadi pusat aktivitas praktikan. Selain ruang utama, terdapat beberapa ruangan pendukung khusus, antara lain Ruang Cetak (biasa disebut Ruang Granulasi), penyimpanan, serta Ruang Diskusi Khusus Dosen/Asisten.

Di antara seluruh fasilitas tersebut, Ruang Granulasi (Ruang Cetak) menjadi area paling kritis (*Critical Control Point*). Ruangan ini digunakan untuk proses fabrikasi inti, mulai dari pencampuran bahan (*mixing*) hingga pencetakan tablet. Mengingat tingginya risiko paparan bahan kimia aktif berbentuk serbuk dan sensitivitas produk terhadap kondisi lingkungan, ruangan ini memerlukan pengawasan ketat, baik dari aspek keselamatan kerja maupun pengendalian mutu lingkungan.



Gambar 1. 2 Ruang Granulasi

Berdasarkan observasi awal bersama dengan analis lab, mekanisme pengawasan operasional dan keselamatan di Laboratorium Teknologi Sediaan Padat, khususnya

di Ruang Granulasi, masih dijalankan secara konvensional dan memiliki beberapa keterbatasan yang signifikan:

1. **Pengawasan Kepatuhan APD (Alat Pelindung Diri):** Saat ini, pengecekan kelengkapan APD (jas laboratorium, masker, sarung tangan) hanya dilakukan secara visual oleh asisten laboratorium di awal sesi praktikum. Namun, pengawasan ini menjadi tidak efektif ketika praktikan sudah berada di dalam Ruang Granulasi yang tertutup. Kelalaian penggunaan masker saat proses granulasi sering terjadi dan luput dari pantauan, padahal risiko inhalasi partikel serbuk obat sangat tinggi. Studi menunjukkan bahwa ketidakpatuhan penggunaan APD di laboratorium pendidikan sering disebabkan oleh kurangnya pengawasan *real-time* yang konsisten [33].
2. **Skrining Kesehatan Praktikan:** Belum tersedia prosedur objektif untuk memantau kondisi kesehatan praktikan sebelum memasuki area steril/semi-steril. Praktikan yang sedang dalam kondisi tidak fit (misalnya demam atau flu) seringkali memaksakan diri mengikuti praktikum demi presensi. Hal ini tidak hanya membahayakan praktikan yang bersangkutan, tetapi juga berpotensi mengontaminasi sediaan obat yang sedang diproduksi (kontaminasi silang biologis), yang secara tegas dilarang dalam standar CPOB (Cara Pembuatan Obat yang Baik) (butuh referensi lanjutan).
3. **Monitoring Lingkungan (Suhu dan Kelembapan):** Belum ada sistem pemantauan yang digunakan pada ruangan ini sehingga sulit menjaga suhu ruangan tetap stabil. Penjagaan suhu ruangan tetap stabil hanya dilakukan dengan cara menghidupkan AC di dalam ruangan secara terus menerus. Pengecekan dilakukan secara insidental, sehingga fluktuasi suhu dan kelembapan yang terjadi di tengah proses produksi seringkali tidak terdeteksi. Padahal, standar ruang produksi sediaan padat mensyaratkan pengendalian suhu (umumnya 20-27°C) dan kelembapan (RH 40-60%) (butuh referensi valid terkait nilai ini) yang ketat untuk mencegah kerusakan sifat fisik granul/tablet.

4. **Pengukuran Dimensi Sediaan (Quality Control):** Proses *Quality Control* (QC) fisik tablet, yaitu pengukuran diameter dan ketebalan, saat ini masih dilakukan secara konvensional menggunakan jangka sorong manual satu per satu. Berdasarkan observasi operasional, metode manual ini memerlukan waktu sekitar 20–40 detik per sampel, mulai dari penempatan alat hingga pencatatan data. Metode ini menjadi titik hambat (*bottleneck*) dalam alur praktikum karena sifatnya yang sangat memakan waktu (*time-consuming*), terutama ketika jumlah sampel tablet yang harus dievaluasi cukup banyak. Ketergantungan pada prosedur manual ini menyebabkan inefisiensi waktu praktikum, di mana mahasiswa menghabiskan sebagian besar durasi sesi hanya untuk proses pengukuran dan pencatatan data secara manual. Sebaliknya, sistem otomatis yang diusulkan dirancang untuk menyelesaikan seluruh siklus pengukuran dalam waktu < 3 detik, selain itu, metode ini memiliki variabilitas hasil akibat *human error*. Penggunaan teknologi ini diusulkan bukan hanya untuk menjaga presisi, melainkan sebagai upaya digitalisasi dan otomatisasi pengukuran guna meningkatkan efisiensi operasional laboratorium, sehingga data keseragaman ukuran dapat diperoleh secara instan dan terdokumentasi secara sistematis.

Keterbatasan mekanisme pengawasan dan pengukuran yang masih bersifat manual dan parsial sebagaimana dipaparkan di atas menciptakan celah risiko yang signifikan, baik terhadap keselamatan kerja maupun validitas mutu produk farmasi. Oleh karena itu, untuk merancang solusi teknologi yang adaptif dan tepat sasaran, analisis mendalam terhadap peran, kebutuhan, dan kendala yang dihadapi oleh para pemangku kepentingan (*stakeholders*) menjadi langkah krusial yang harus dipetakan. Upaya penyelesaian masalah ini akan melibatkan beberapa stakeholder, antara lain:

1. **Mahasiswa/Praktikan**, sebagai pengguna utama laboratorium. Dengan sistem yang lebih terkontrol, praktikum dapat berlangsung lebih aman, nyaman, dan efisien, serta mengurangi risiko kecelakaan dan kesalahan praktikum.

2. **Dosen dan Laboran**, sebagai penanggung jawab kegiatan praktikum. Sistem pendukung akan membantu pengawasan kepatuhan APD, kondisi lingkungan, serta kualitas hasil praktikum tanpa bergantung sepenuhnya pada pengawasan manual.
3. **Fakultas Farmasi**, yang bertanggung jawab terhadap mutu pendidikan dan keselamatan mahasiswa. Penyelesaian masalah ini dapat meningkatkan standar laboratorium dan citra institusi.
4. **Pengelola Laboratorium**, yang berperan dalam operasional dan pemeliharaan fasilitas. Sistem monitoring terintegrasi mempermudah pengambilan keputusan terkait perawatan dan peningkatan fasilitas.

Guna menjawab tantangan operasional yang dihadapi oleh para stakeholder di atas, intervensi teknologi modern menjadi sebuah keniscayaan. Saat ini, teknologi seperti *Internet of Things (IoT)* dan *Computer Vision* sebenarnya telah banyak diadopsi untuk meningkatkan efisiensi di sektor industri farmasi. Meskipun demikian, penerapan teknologi tersebut dalam konteks laboratorium pendidikan seringkali masih dilakukan secara terpisah dan belum terintegrasi sepenuhnya. Oleh karena itu, tinjauan singkat terhadap beberapa penelitian relevan berikut ini diperlukan untuk memetakan capaian teknologi saat ini serta mengidentifikasi ruang pengembangan yang akan dikerjakan dalam penelitian ini.

Penelitian terkait pengawasan kepatuhan penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) telah banyak dilakukan, khususnya di lingkungan kerja berisiko seperti laboratorium dan fasilitas kesehatan. Pillai et al. [7] menyatakan bahwa kepatuhan penggunaan APD sangat dipengaruhi oleh sistem pengawasan dan penerapan prosedur keselamatan yang konsisten. Kurangnya pemantauan secara real-time menyebabkan rendahnya tingkat kepatuhan meskipun aturan telah ditetapkan.

Seiring perkembangan teknologi, pendekatan berbasis computer vision mulai digunakan untuk mendeteksi kepatuhan penggunaan APD secara otomatis. Beberapa studi menunjukkan bahwa sistem deteksi berbasis kamera dan deep learning mampu mengenali atribut APD seperti masker dan jas laboratorium secara real-time dengan tingkat akurasi yang tinggi [8]. Meskipun demikian, sebagian

besar penelitian tersebut masih difokuskan pada lingkungan industri atau fasilitas kesehatan, dan belum banyak diterapkan pada laboratorium pendidikan farmasi.

Dalam domain instrumentasi medis dan IoT, [6] pada tahun 2023 telah mengajukan solusi melalui penelitian berjudul *'Rancang Bangun Monitoring Presensi dan Suhu Tubuh Berbasis Internet of Things (IoT)'*. Hasil pengujian pada penelitian tersebut menunjukkan performa sistem yang andal dengan rata-rata simpangan (*margin of error*) sebesar $0,5^{\circ}\text{C}$. Studi ini menjadi landasan penting bagi perancangan sistem di Laboratorium Sediaan Padat, karena memvalidasi bahwa sensor suhu digital mampu memberikan data objektif terkait kondisi fisik seseorang. Pemanfaatan parameter suhu tubuh sebagai variabel deteksi dini sangat krusial, tidak hanya untuk memastikan kesiapan fisik praktikan, tetapi juga untuk meminimalisir risiko kontaminasi biologis pada sediaan obat akibat personel yang sakit[6].

Royan dkk. mengembangkan sistem bertajuk *'Rancang Bangun Pengukur Suhu Tubuh Tanpa Sentuh Berbasis IoT untuk Screening Mahasiswa...'* yang menerapkan metode pengukuran non-invasif. Hasil evaluasi sistem menunjukkan galat pengukuran tertinggi sebesar $0,89^{\circ}\text{C}$. Mengingat angka deviasi tersebut masih berada di bawah batas toleransi yang ditetapkan ($<1^{\circ}\text{C}$), maka sistem ini dinilai telah memenuhi standar validitas pengukuran suhu untuk aplikasi pemantauan kesehatan[9].

Pengendalian suhu dan kelembapan merupakan faktor penting dalam menjaga stabilitas bahan dan sediaan farmasi. Penelitian terkait monitoring lingkungan laboratorium menunjukkan bahwa fluktuasi suhu dan kelembapan yang tidak terpantau dapat memengaruhi kualitas produk serta kenyamanan dan keselamatan pengguna laboratorium [10]. Beberapa sistem monitoring berbasis IoT telah dikembangkan untuk memantau suhu dan kelembapan secara real-time dan menampilkan data dalam bentuk dashboard pemantauan.

Standar lingkungan produksi farmasi juga menekankan pentingnya pengendalian suhu dan kelembapan dalam rentang tertentu untuk mencegah degradasi sifat fisik dan kimia sediaan padat [11]. Meskipun teknologi monitoring lingkungan telah

tersedia, penerapannya di laboratorium pendidikan masih terbatas dan belum terintegrasi dengan sistem pengawasan keselamatan dan kualitas praktikum.

Pengukuran dimensi tablet, seperti diameter dan ketebalan, merupakan bagian dari pengendalian mutu fisik sediaan padat. Secara konvensional, pengukuran dilakukan menggunakan jangka sorong (caliper), namun metode ini memiliki keterbatasan berupa waktu pengukuran yang lama dan potensi kesalahan akibat human error. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa integrasi sistem akuisisi data digital dapat digunakan untuk mengukur dimensi objek secara non-kontak dengan tingkat presisi yang konsisten serta mampu melakukan pendataan secara otomatisasi. Penggunaan sistem ini memastikan hasil pengukuran tetap valid sesuai standar farmakope namun dengan efisiensi waktu yang jauh lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. [12].

Namun, sebagian besar penelitian tersebut diterapkan pada skala industri, sementara pemanfaatannya dalam konteks laboratorium pendidikan sebagai alat bantu praktikum dan pembelajaran masih jarang diteliti.

Berdasarkan tinjauan literatur yang telah dipaparkan, dapat disimpulkan bahwa penelitian-penelitian terdahulu cenderung berfokus pada pengembangan solusi secara parsial. Sebagian besar studi hanya menitikberatkan pada monitoring lingkungan berbasis IoT atau deteksi kepatuhan APD menggunakan *Deep Learning* secara terpisah. Hingga saat ini, belum ditemukan penelitian yang menawarkan arsitektur sistem terintegrasi yang mampu menggabungkan aspek pengawasan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), pemantauan kondisi lingkungan kritis, serta digitalisasi pengukuran mutu sediaan farmasi dalam satu platform terpadu (*unified platform*). Ketiadaan integrasi ini menyebabkan proses pengawasan di laboratorium tetap berjalan secara terfragmentasi dan kurang efisien.

1.1.2 Analisis Masalah dan Konstrain

Permasalahan di laboratorium sediaan padat perlu dianalisis dari berbagai aspek agar solusi yang dirancang tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga relevan secara operasional, etis, dan berkelanjutan.

1. Aspek Ekonomi

Ketidakteraturan penggunaan APD serta tidak adanya penyaringan kondisi kesehatan praktikan berpotensi menimbulkan kecelakaan kerja dan kontaminasi, yang berdampak pada peningkatan biaya operasional laboratorium, seperti penggantian bahan, perawatan fasilitas, dan pengulangan praktikum. Selain itu, proses pengukuran tablet obat yang masih manual membutuhkan waktu yang lama, sehingga menurunkan efisiensi pemanfaatan sumber daya laboratorium. Standar GMP menegaskan bahwa ketidakefisienan proses dapat meningkatkan biaya dan menurunkan mutu hasil kerja.

Sehingga konstrainnya ekonominya yaitu Sistem harus mampu mengukur dimensi tablet dan mendeteksi kondisi praktikan jauh lebih cepat dibandingkan metode manual untuk mengurangi *downtime* laboratorium. Berdasarkan *lean of manufacturing*, nilai waktu proses yang ditetapkan yaitu dengan target dibawah 7 detik guna meminimalisir waktu tunggu. Namun, system ini bersifat soft-realtime system yang berarti keterlambatan pemrosesan data tidak akan menyebabkan bahaya namun hanya menunjukkan penurunan kemampuan dari sistem.

2. Aspek Lingkungan

Kualitas udara dan suhu ruangan laboratorium yang tidak terpantau dengan baik dapat meningkatkan paparan debu farmasi dan menurunkan kenyamanan serta keselamatan praktikan. Lingkungan laboratorium yang tidak terkendali juga berpotensi meningkatkan limbah akibat kesalahan praktikum. WHO dan ISO menekankan pentingnya pengendalian lingkungan kerja untuk mencegah dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan.

Sehingga konstrain dari lingkungan yaitu sistem harus mampu memantau suhu dan partikulat debu dengan akurasi yang sesuai standar ruang penyimpanan obat. Mengacu pada USP (*United States Pharmacopeia*), penyimpanan bahan farmasi umumnya memerlukan "*Controlled Room Temperature*". Meskipun suhu ideal adalah 20°-25°C, *excursion* (penyimpangan sementara) yang diizinkan adalah antara 15° hingga 30°C. Oleh karena itu, sistem harus dikonstrain untuk memberi peringatan jika suhu keluar dari range 18-30°C (sebagai safety margin).

Pemantauan debu (PM2.5) mengacu pada ISO 14644 untuk menjaga agar ruang granulasi tidak terkontaminasi partikel asing yang berlebih.

3. Aspek Sustainability

Ketergantungan pada prosedur manual dalam pemeriksaan APD, pemantauan kondisi kesehatan, dan pengukuran tablet membuat sistem laboratorium sangat bergantung pada faktor manusia. Dalam jangka panjang, kondisi ini sulit dipertahankan secara konsisten. Penerapan sistem pemantauan dan otomasi berbasis teknologi dapat mendukung keberlanjutan operasional laboratorium sekaligus membangun budaya keselamatan dan ketelitian sejak dini bagi mahasiswa.

Sehingga konstrain untuk aspek sustainability adalah system mampu beroperasi secara kontinyu selama jam operasional lebih kurang 8 jam tanpa overheat dengan target $< 80^{\circ}\text{C}$ untuk mengurangi ketergantungan intervensi manusia sesuai dengan standar GAMP 5 (Good Automated Manufacturing Practice)

4. Aspek Manufakturabilitas

Solusi yang dirancang harus mempertimbangkan keterbatasan laboratorium pendidikan, seperti anggaran, ruang, dan kemudahan perawatan. Sistem yang terlalu kompleks berisiko sulit diimplementasikan dan tidak berkelanjutan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan teknologi yang modular, mudah diintegrasikan, serta sesuai dengan alur praktikum yang sudah ada, tanpa mengganggu aktivitas utama di laboratorium.

Sehingga konstrain untuk aspek ini yaitu desain sistem harus ergonomis agar tidak memakan banyak ruang di dalam ruang granulasi yang terbatas dan juga mudah dipindahkan. Dimensi maksimal 50 cm x 50 cm dengan desain modular untuk memudahkan lepas-pasang untuk perawatan sesuai dengan standar Ergonomi Laboratorium dan GLP (*Good Laboratory Practice*).

5. Aspek Etika

Pengawasan penggunaan APD dan kondisi kesehatan praktikan berkaitan dengan tanggung jawab institusi dalam menjamin keselamatan bersama. Pembiaran praktikan yang sakit untuk tetap masuk laboratorium dapat meningkatkan risiko

kontaminasi dan membahayakan pihak lain. Prinsip keselamatan laboratorium menekankan bahwa perlindungan terhadap individu dan lingkungan kerja merupakan kewajiban etis yang tidak dapat diabaikan.

Sehingga konstrain dari aspek ini yaitu sistem mampu meminimalisir kesalahan deteksi praktikan yang sakit dengan selisih maksimal $\pm 0,5^\circ$ ataupun yang tidak memakai APD dengan akurasi deteksi $> 90\%$ sesuai dengan CPOB dari BPOM tentang kewajiban mengenakan pakaian pelindung dan pemeriksaan kesehatan.

6. Aspek Kesehatan dan Regulasi

Laboratorium farmasi wajib memenuhi standar keselamatan dan mutu yang telah ditetapkan. Ketidakpatuhan terhadap penggunaan APD, pengendalian lingkungan, serta ketelitian pengukuran tablet berpotensi melanggar prinsip biosafety dan GMP. Regulasi tersebut menegaskan bahwa personel, lingkungan, dan proses harus berada dalam kondisi terkendali untuk menjamin keamanan dan kualitas sediaan farmasi.

Sehingga konstrain untuk aspek ini yaitu pengukuran dimensi tablet memiliki penyimpangan $< 5\%$ atau resolusi pengukuran hingga 0,1 mm dibandingkan pengukuran manual sesuai dengan ketentuan pada Farmakope Indonesia Ed. VI dan USP tentang keseragaman sediaan dan Tablet Breaking Force (dimensi mempengaruhi kekerasan) Otomasi dan Efisiensi Pengukuran Dimensi Obat: Sistem pengukuran dimensi tablet dirancang untuk mengoptimalkan alur kerja evaluasi mutu di laboratorium dengan target utama reduksi waktu pemrosesan data. Mengingat standar ketat dalam farmakope, sistem ini difokuskan pada kemampuan otomasi pendataan yang mampu menghasilkan nilai diameter dan ketebalan secara instan dalam hitungan detik. Penggunaan sistem ini bertujuan untuk mengeliminasi prosedur pengukuran manual yang lambat dan repetitif, terutama untuk sediaan dengan dimensi kecil yang memiliki rentang diameter rata-rata 5,10 mm hingga 7,16 mm dan ketebalan 3,03 mm hingga 3,06 mm (Ajit Kulkarni dkk., 2014).

Kondisi Pencahayaan Terkendali (*Controlled Lighting*): Akurasi deteksi dimensi tablet sangat bergantung pada kualitas citra yang dihasilkan oleh sensor kamera. Oleh karena itu, modul pengukuran dirancang dengan mekanisme tertutup (*closed-enclosure*) yang memiliki parameter pencahayaan ketat. Target intensitas

pencahayaannya ditetapkan pada kisaran 700–1000 Lux, merujuk pada standar SNI 03-6197-2000 untuk kategori "Pekerjaan Halus dan Pemeriksaan Warna" guna meminimalkan *noise* digital.

Selain intensitas, sistem ini juga dikonstrainsi memiliki tingkat uniformitas pencahayaan (*light uniformity*) >90%. Tingkat kerataan cahaya yang tinggi ini mutlak diperlukan dalam sistem *machine vision* untuk mengeliminasi munculnya bayangan (*shadows*) maupun pantulan tidak merata (*glare*) pada permukaan tablet. Dengan distribusi cahaya yang seragam, proses deteksi tepi (*edge detection*) dapat berjalan optimal di seluruh area pandang tanpa distorsi, memastikan hasil pengukuran dimensi yang konsisten dan valid.

1.1.3 Kebutuhan yang harus dipenuhi

Solusi yang diajukan harus memenuhi kebutuhan berikut:

1. Memastikan penggunaan APD praktikan secara konsisten di dalam ruang laboratorium guna meminimalkan risiko paparan bahan berbahaya.
2. Menyaring kondisi kesehatan awal praktikan untuk mencegah risiko kontaminasi.
3. Memantau suhu dan kualitas udara laboratorium secara real-time.
4. Membantu pengukuran tablet obat secara lebih cepat dibanding metode manual.
5. Mudah dioperasikan oleh mahasiswa, dosen, dan laboran.
6. Menyediakan penyimpanan data untuk keperluan evaluasi dan dokumentasi.
7. Dapat diterapkan dengan biaya terjangkau dan mudah dirawat di lingkungan laboratorium pendidikan.

1.1.4 Tujuan

Tujuan dari solusi yang diajukan adalah merancang dan membangun sistem pendukung laboratorium sediaan padat yang mampu meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan ketelitian kegiatan praktikum. Sistem ini diharapkan dapat membantu

memastikan kelengkapan APD dan kondisi awal praktikan, memantau suhu serta kualitas udara laboratorium secara real-time, serta mendukung proses pengukuran tablet obat melalui otomasi digital guna meningkatkan efisiensi waktu dan kemudahan dokumentasi dibandingkan metode manual. Selain itu, sistem dirancang agar mudah dioperasikan, memiliki pencatatan data yang dapat dievaluasi kembali, dan dapat diterapkan secara berkelanjutan di lingkungan laboratorium pendidikan. Dengan penerapan sistem ini, diharapkan kualitas pelaksanaan praktikum meningkat serta risiko kesalahan dan kecelakaan kerja di laboratorium dapat diminimalkan.

1.2 Solusi

1.2.1 Karakteristik Produk

Produk yang dirancang merupakan sistem tertanam (embedded system) cerdas yang mengintegrasikan sensor, pemrosesan data, dan aktuator untuk memecahkan masalah pengawasan manual di laboratorium. Karakteristik utama sistem berdasarkan arsitektur komputernya adalah sebagai berikut:

a. Multi-Object Detection and Measurement

Sistem memanfaatkan Sensor sebagai perangkat input utama untuk dua fungsi sekaligus. Pertama, mendeteksi kelengkapan APD (masker, jas lab, sarung tangan). Kedua, melakukan ekstraksi data dimensi fisik obat (diameter dan ketebalan). Seluruh data visual diolah oleh unit pemroses utama untuk menyediakan hasil yang instan, guna menggantikan prosedur pengukuran manual yang lambat dan meminimalisir risiko kesalahan manusia.

b. Health & Environmental Screening

Sistem mengintegrasikan Multi-Sensor Input untuk skrining kesehatan praktikan, serta sensor lingkungan (Suhu/Kelembaban dan Partikulat Debu) untuk memantau ruang granulasi. Data dari sensor-sensor ini diakuisisi secara real-time untuk memastikan kepatuhan terhadap standar CPOB.

c. Integration Capability and Notification System

Sebagai respon terhadap data masukan, sistem dilengkapi dengan perangkat Output dan Aktuator. Jika terdeteksi pelanggaran (APD tidak lengkap atau suhu tinggi), sistem akan mengaktifkan pemberitahuan visual (Layar LCD/Lampu Indikator) di lokasi. Sistem akan terintegrasi juga dengan layar LCD untuk menampilkan hasil

pengukuran dimensi obat. Selain itu, modul komunikasi (I/O Nirkabel) akan mengirimkan notifikasi peringatan (alert) ke dashboard aplikasi mobile milik asisten laboratorium.

d. Operational Duration

Untuk mendukung operasional perangkat keras (kamera, sensor, dan prosesor) secara terus-menerus, sistem dilengkapi manajemen daya yang stabil agar mampu beroperasi minimal 8 jam (07.30 - 16.00 WIB) tanpa overheating atau penurunan kinerja komponen.

e. Computing Performance & Latency

Sistem dirancang dengan arsitektur pemrosesan yang efisien, mampu mengolah data citra dan sinyal sensor dengan latensi target < 7 detik. Sistem dapat mencapai waktu respons yang cepat detik karena menggunakan pendekatan hybrid, yaitu didukung perangkat keras dengan performa komputasi tinggi (CPU/GPU) untuk pemrosesan lokal (edge computing) sehingga tidak ada delay jaringan, serta optimasi software melalui pra-pemrosesan ringan, pengaturan input yang efisien, dan akselerasi komputasi agar seluruh proses berjalan cepat dengan latensi rendah. Hal ini memastikan proses input-output berjalan lancar tanpa menghambat alur masuk praktikan.

1.2.2 Usulan Solusi

1.2.2.1 Solusi 1: Rancang Bangun *Integrated Smart Station* pada Laboratorium Farmasi Berbasis *Computer Vision* dan *Fuzzy Logic* untuk Pengawasan K3, Lingkungan, dan Pengukuran Dimensi Obat Otomatis

Sistem yang diusulkan dirancang sebagai satu kesatuan arsitektur Smart Laboratory Station yang mengintegrasikan empat fungsi utama, yaitu deteksi Alat Pelindung Diri (APD), skrining kesehatan, monitoring lingkungan, dan pengukuran dimensi obat. Seluruh subsistem tersebut terhubung ke unit pemrosesan pusat yang berfungsi mengatur alur logika sistem serta melakukan sentralisasi data pada dashboard monitoring. Arsitektur ini memungkinkan pengawasan laboratorium dilakukan secara terintegrasi, real-time, dan terdokumentasi dengan baik. Sistem pendeteksi kelengkapan APD berbasis kamera diusulkan sebagai solusi untuk meningkatkan keselamatan dan kepatuhan praktikan selama beraktivitas di dalam laboratorium sediaan padat, khususnya pada ruang granulasi. Pada sistem ini,

kamera dipasang di dalam laboratorium dengan orientasi menghadap ke area masuk ruangan, sehingga mampu menangkap citra praktikan saat memasuki area kerja. Penempatan kamera tersebut memungkinkan proses pemantauan dilakukan secara otomatis dan berkelanjutan tanpa mengganggu alur masuk praktikan, sekaligus meminimalkan kemungkinan terjadinya blind spot pengamatan.

Secara umum, proses sistem dimulai ketika praktikan memasuki ruang granulasi. Kamera akan melakukan akuisisi citra dan menampilkan hasil tangkapan secara *real-time* melalui fitur *streaming* pada sistem pemantauan. Citra yang diperoleh kemudian diproses menggunakan pendekatan *computer vision* untuk mendeteksi kelengkapan APD yang dikenakan praktikan. Proses ini dilakukan secara non-kontak sehingga tidak mengganggu aktivitas praktikan dan tetap menjaga kebersihan lingkungan laboratorium.

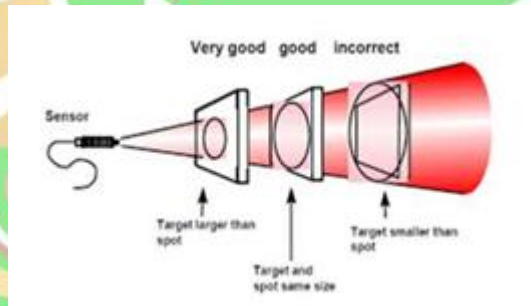
Tahapan komputasi sistem meliputi akuisisi citra, pra-pemrosesan untuk meningkatkan kualitas visual, deteksi dan klasifikasi objek APD, serta evaluasi hasil deteksi berdasarkan parameter kelengkapan yang telah ditentukan. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, sistem menentukan status kepatuhan praktikan. Apabila terdeteksi pelanggaran, sistem akan memberikan peringatan visual serta mengirimkan notifikasi [34]. Selain memberikan notifikasi, sistem juga melakukan pencatatan data pelanggaran secara otomatis. Data tersebut disimpan sebagai riwayat harian yang mencakup jumlah dan frekuensi pelanggaran, sehingga dapat digunakan sebagai arsip digital, bahan evaluasi kepatuhan praktikan, serta pendukung pengambilan keputusan dalam upaya peningkatan keselamatan dan pengelolaan laboratorium secara berkelanjutan.



Gambar 1. 3 Ilustrasi Pendeteksian APD

Dari segi kesehatan praktikan, deteksi dini kondisi kesehatan praktikan merupakan langkah krusial dalam manajemen laboratorium. Salah satu indikator fisiologis utama yang paling efektif untuk mendeteksi kondisi patologis adalah suhu tubuh. Secara medis, peningkatan suhu tubuh (demam) merupakan respons biologis awal terhadap infeksi atau kelainan sistemik pada tubuh manusia. Oleh karena itu, parameter suhu tubuh dipilih sebagai acuan utama dalam sistem deteksi ini.

Terkait instrumen pengukuran, pemilihan sensor harus mempertimbangkan aspek akurasi dan higienitas. Sensor termometer inframerah (*infrared thermometer sensor*) menjadi solusi optimal karena kemampuannya melakukan pengukuran secara nirkontak (*non-contact*), sehingga meminimalkan risiko kontaminasi silang. Validitas sensor ini telah dibuktikan oleh berbagai penelitian terdahulu; salah satu studi mencatat tingkat akurasi mencapai 97,99% [10], sementara penelitian lain yang menguji sensor ini pada subjek manusia menunjukkan akurasi hingga 98% [11]. Meskipun demikian, penggunaan sensor suhu tunggal memiliki kelemahan signifikan, yaitu sensitivitas terhadap jarak pengukuran.

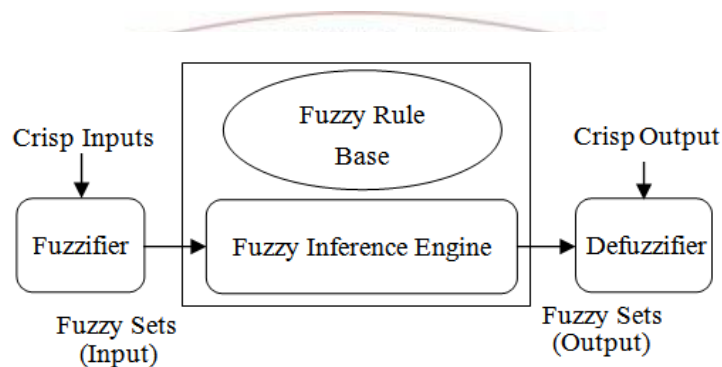


Gambar 1. 4 Ilustrasi pengaruh jarak terhadap pengukuran suhu

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Intan dkk. [12], pengukuran suhu tubuh pada jarak 0 – 10 cm tidak memberikan perbedaan yang signifikan hanya sekitar $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Sedangkan, pada jarak diatas itu mulai terlihat pengaruhnya dengan perbedaan pengukuran mencapai $\pm 0,8^{\circ} - 1^{\circ}\text{C}$. Perubahan jarak antara sensor dan objek dapat menghasilkan deviasi data suhu yang tidak merepresentasikan kondisi sebenarnya. Untuk mengatasi kendala tersebut, diperlukan integrasi sensor jarak sebagai variabel validasi guna memastikan pengukuran dilakukan pada rentang yang ideal.

Guna mengolah data dari kedua sensor tersebut secara presisi, penelitian ini menerapkan metode *Fuzzy Logic*. *Fuzzy Logic* adalah metode komputasi yang

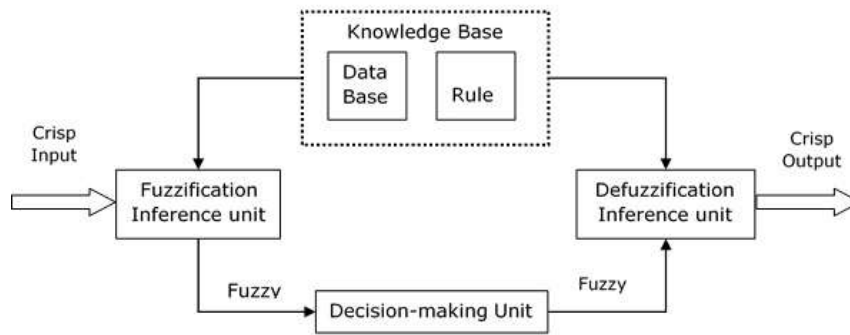
memetakan variabel linguistik dari ruang input ke ruang output dengan menggunakan derajat keanggotaan (*membership degree*), bukan sekadar logika biner benar (*true*) atau salah (*false*) [fuzzy logic]. Pendekatan ini dipilih karena masalah pengukuran suhu dan jarak memiliki ketidakpastian yang sulit ditangani oleh logika tegas (*crisp logic*). Menurut Argifa dkk. [13], penggunaan logika fuzzy memungkinkan klasifikasi kondisi kesehatan yang lebih fleksibel dan adaptif. Hal ini diperkuat oleh temuan Tan dkk. [14] yang menyatakan bahwa akurasi sensor inframerah sangat bergantung pada jarak pengukuran, sehingga diperlukan mekanisme kompensasi cerdas yang dapat difasilitasi oleh sistem inferensi fuzzy.



Gambar 1. 5 Fuzzy Logic Diagram

Hasil keluaran dari proses inferensi fuzzy ini berupa nilai akumulasi suhu yang kemudian digunakan oleh sistem kontrol utama untuk memberikan keputusan otomatis berupa izin masuk dan menggunakan ruangan. Output validasi ini nantinya akan menggunakan tampilan visual yang sama dengan pengecekan APD.

Dari sisi kualitas udara dan suhu ruangan granulasi, sistem bekerja dengan memanfaatkan sensor suhu–kelembaban untuk mengukur temperatur dan kelembaban relatif udara, serta sensor partikulat udara untuk mendeteksi konsentrasi debu halus di dalam ruangan. Data hasil pengukuran dari seluruh sensor dikirimkan secara real-time ke mikrokontroler sebagai unit pemroses utama. Selanjutnya, data tersebut diolah menggunakan metode logika fuzzy sebelum ditampilkan pada antarmuka aplikasi mobile. Pendekatan ini dipilih karena kondisi lingkungan ruang granulasi bersifat dinamis dan tidak selalu dapat direpresentasikan secara tegas dengan batas nilai tertentu.



Gambar 1. 6 Inferensi Sistem Fuzzy

Logika fuzzy merupakan metode pengambilan keputusan yang didasarkan pada derajat keanggotaan suatu nilai terhadap suatu himpunan, bukan pada nilai biner benar atau salah. Pada sistem ini, nilai suhu, kelembaban, dan konsentrasi partikulat tidak langsung diklasifikasikan sebagai sesuai atau tidak sesuai, melainkan dipetakan ke dalam variabel linguistik seperti suhu dingin, normal, atau panas; kelembaban kering, normal, atau lembab; serta kualitas udara bersih, sedang, atau kotor. Setiap variabel memiliki derajat keanggotaan tertentu yang mencerminkan tingkat kedekatannya terhadap kondisi ideal.

Proses logika fuzzy pada sistem ini meliputi tahap fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi. Pada tahap fuzzifikasi, data numerik dari sensor diubah menjadi derajat keanggotaan pada masing-masing himpunan fuzzy. Tahap inferensi dilakukan dengan menerapkan aturan-aturan fuzzy yang telah dirancang untuk merepresentasikan penilaian kondisi lingkungan ruang granulasi. Aturan-aturan ini mengombinasikan kondisi suhu, kelembaban, dan partikulat udara untuk menghasilkan penilaian kondisi lingkungan secara menyeluruh. Selanjutnya, tahap defuzzifikasi digunakan untuk mengubah hasil inferensi fuzzy menjadi nilai keluaran yang lebih mudah diinterpretasikan, seperti tingkat kondisi ruangan atau status lingkungan.

Hasil pengolahan logika fuzzy kemudian dikirimkan ke server dan ditampilkan melalui antarmuka aplikasi mobile dalam bentuk informasi yang mudah dipahami oleh pengguna. Tampilan web menyajikan data suhu, kelembaban, dan konsentrasi partikulat udara secara real-time, disertai dengan indikator status kondisi ruangan berdasarkan hasil logika fuzzy, seperti kondisi aman, waspada, atau tidak sesuai standar.

Penerapan metode logika fuzzy dalam sistem monitoring ini memberikan keunggulan dalam hal fleksibilitas dan adaptabilitas pengolahan data lingkungan. Sistem mampu memberikan penilaian kondisi ruangan secara lebih realistis sehingga membantu operator dalam melakukan pengawasan dan pengambilan keputusan secara lebih efektif. Dengan output yang informatif dan real-time, sistem ini mendukung peningkatan kualitas pengendalian lingkungan serta konsistensi proses pada ruang granulasi farmasi.

Pengukuran dimensi fisik sediaan obat padat, khususnya diameter dan ketebalan tablet atau kapsul, merupakan tahapan penting dalam proses pengendalian mutu (quality control) sediaan farmasi[44]. Parameter dimensi tersebut berkaitan langsung dengan keseragaman dosis, kenyamanan penggunaan, serta kepatuhan terhadap standar farmakope yang berlaku. Pada praktik konvensional di laboratorium, pengukuran dimensi tablet umumnya masih dilakukan secara manual menggunakan jangka sorong atau mikrometer.

Metode manual ini bersifat kontak langsung, membutuhkan waktu relatif lama, serta sangat bergantung pada ketelitian operator, sehingga berpotensi menimbulkan variasi hasil akibat subjektivitas manusia dan kesalahan pembacaan. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem pengukuran yang lebih objektif, konsisten, dan higienis untuk mendukung proses evaluasi mutu sediaan obat padat.

Solusi yang diusulkan dalam penelitian ini adalah sistem pengukuran diameter dan ketebalan tablet/kapsul berbasis machine vision dengan pendekatan computer vision klasik (non-deep learning) yang memanfaatkan dua kamera statis sebagai sensor visual utama[45]. Tablet atau kapsul ditempatkan padaudukan khusus (fixture) yang dirancang untuk menjaga posisi dan orientasi objek tetap stabil selama proses pengukuran. Satu kamera diposisikan di bagian atas objek untuk memperoleh citra tampak atas guna mengukur diameter tablet, sedangkan kamera lainnya ditempatkan pada sisi samping untuk menangkap profil objek dalam rangka mengukur ketebalan. Penggunaan dua kamera statis ini memungkinkan pengukuran dua parameter geometris utama dilakukan secara simultan tanpa memerlukan pemindahan atau rotasi objek secara manual.

Citra yang diperoleh dari masing-masing kamera selanjutnya diproses menggunakan teknik pengolahan citra digital klasik, yang meliputi konversi citra

ke grayscale, peningkatan kontras, segmentasi objek melalui thresholding, serta deteksi tepi dan kontur untuk memperoleh batas geometris tablet secara akurat[46]. Dimensi diameter dan ketebalan diekstraksi berdasarkan perhitungan jarak antar titik kontur dalam satuan piksel. Nilai tersebut kemudian dikonversi ke satuan milimeter

Untuk menghitung diameter dari obat adalah sebagai berikut:

$$S = \frac{L_{real}}{L_{px}} \quad \text{[Persamaan 1.1]}$$

Keterangan:

- S = f aktor skala (mm/piksel)
- L_{real} = panjang objek referensi nyata (mm)
- L_{px} = panjang objek referensi pada citra (piksel)

Dan untuk menghitung ketebalan:

$$D_{mm} = D_{px} \times S \quad \text{[Persamaan 1.2]}$$

$$T_{mm} = T_{px} \times S \quad \text{[Persamaan 1.3]}$$

Keterangan:

- D_{mm} = diameter tablet dalam mm
- T_{mm} = ketebalan tablet dalam mm
- D_{px} = ukuran tablet pada citra (piksel)

Melalui proses kalibrasi kamera menggunakan objek referensi dengan dimensi yang telah diketahui. Proses kalibrasi ini berperan penting dalam akurasi, repeatability, dan konsistensi hasil pengukuran.

Dari sisi implementasi sistem, proses akuisisi citra, pemrosesan visual, perhitungan dimensi, dan penampilan hasil dirancang agar dapat berjalan secara real-time. Hasil pengukuran diameter dan ketebalan tablet ditampilkan secara langsung melalui layar LCD sebagai antarmuka utama pengguna, sehingga memudahkan proses observasi dan pencatatan data. Dengan penerapan pendekatan computer vision klasik dan output lokal berbasis LCD, sistem ini diharapkan mampu meningkatkan

efisiensi pengukuran, mengurangi kesalahan akibat faktor manusia, serta mendukung penerapan otomasi sederhana dalam pengendalian mutu fisik sediaan obat padat, khususnya di lingkungan laboratorium pendidikan.

Secara keseluruhan, integrasi dari keempat subproses ini merealisasikan konsep ekosistem laboratorium cerdas yang adaptif. Seluruh aliran data yang heterogen mulai dari deteksi pelanggaran APD, parameter kesehatan pengguna, indeks kualitas udara ruang granulasi, hingga presisi dimensi tablet—diakuisisi dan divisualisasikan secara terpusat melalui dashboard berbasis aplikasi mobile. Penggunaan platform mobile ini dirancang untuk memberikan fleksibilitas akses yang tinggi, memungkinkan pengelola laboratorium memantau dinamika kondisi operasional secara komprehensif tanpa terikat pada lokasi stasiun kerja fisik.

Selanjutnya, sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan pasif, tetapi juga dilengkapi dengan mekanisme peringatan aktif. Selain melalui buzzer dan led, digunakan juga fitur push notification yang bekerja di latar belakang, sistem mampu mendeteksi anomali secara real-time seperti penurunan kualitas udara yang ekstrem atau ketidakpatuhan prosedur keselamatan dan mengirimkan peringatan instan kepada pengguna. Kapabilitas ini memastikan respons cepat terhadap potensi bahaya, sekaligus membentuk basis data digital (digital log) yang penting bagi manajemen laboratorium dalam melakukan evaluasi kepatuhan dan analisis tren jangka panjang berbasis data.

1.2.2.2 Solusi 2: Smart Health & Quality Station pada Ruang Granulasi Berbasis Integrasi RFID dan Laser dengan Pendekatan Digital Signal Processing (DSP) serta Fuzzy Logic untuk Pengawasan K3 dan Mutu Obat

Sistem yang diusulkan dirancang sebagai satu kesatuan arsitektur *Smart Laboratory Station* yang mengintegrasikan empat fungsi utama: deteksi APD, skrining kesehatan, monitoring lingkungan, dan pengukuran dimensi obat. Seluruh sub-sistem ini terhubung pada unit pemrosesan pusat yang mengatur alur logika perizinan masuk (*gate control*) serta sentralisasi data pada dashboard monitoring. Sistem pendeteksi kelengkapan Alat Pelindung Diri (APD) berbasis Radio Frequency Identification (RFID) diusulkan sebagai alternatif solusi untuk meningkatkan kepatuhan dan keselamatan praktikan sebelum memasuki laboratorium sediaan padat. Pada kondisi saat ini, pemeriksaan APD masih

dilakukan secara manual melalui observasi visual, sehingga berpotensi menimbulkan kelalaian dan inkonsistensi dalam penerapan standar keselamatan laboratorium. Sistem berbasis RFID memungkinkan proses verifikasi APD dilakukan secara otomatis, cepat, dan terstruktur.

Solusi ini memanfaatkan tag RFID pasif yang dipasang atau terintegrasi pada setiap APD wajib, seperti jas laboratorium, masker, dan sarung tangan. Setiap praktikan juga dibekali kartu identitas RFID. Pada area pintu masuk laboratorium dipasang RFID reader yang berfungsi membaca keberadaan kartu identitas praktikan sekaligus mendeteksi tag RFID pada APD yang dikenakan. Sistem kemudian membandingkan data yang terbaca dengan daftar kelengkapan APD yang dipersyaratkan [35].

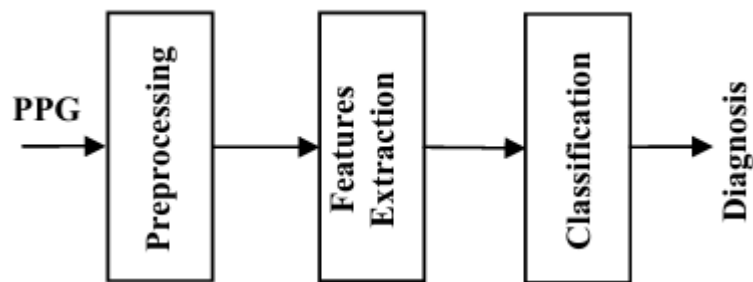
Dari sisi sistem, proses dimulai saat praktikan mendekat ke area pembaca RFID. Reader akan melakukan pemindaian secara otomatis dan mengirimkan data ke unit pengendali. Data tersebut kemudian diproses untuk menentukan apakah seluruh APD yang diwajibkan telah terdeteksi. Apabila kelengkapan terpenuhi, sistem memberikan izin masuk; sebaliknya, jika terdapat APD yang tidak terdeteksi, sistem akan memberikan peringatan melalui indikator visual atau notifikasi kepada asisten laboratorium.

Keunggulan sistem berbasis RFID terletak pada kecepatan pemindaian, kestabilan sistem, dan minimnya ketergantungan pada kondisi pencahayaan, berbeda dengan sistem berbasis kamera. Selain itu, data hasil pemindaian dapat disimpan secara digital sebagai catatan kepatuhan praktikan terhadap penggunaan APD. Sistem dirancang agar mudah dioperasikan, memiliki latensi rendah, dan dapat diintegrasikan dengan sistem manajemen laboratorium yang sudah ada.

Untuk masalah praktikan yang tetap praktikum ketika sakit, alternatif solusi yang diusulkan adalah integrasi antara sensor termometer inframerah dan sensor *pulse oximeter*. Selain suhu tubuh, frekuensi denyut jantung (*heart rate*) merupakan indikator fisiologis vital yang memiliki korelasi erat dengan kondisi demam. Studi yang dilakukan oleh Gregory dkk. [15] menunjukkan adanya hubungan linear positif antara kedua variabel tersebut, di mana setiap peningkatan suhu tubuh sebesar 1°C berkorelasi dengan peningkatan denyut jantung rata-rata sebesar 7 denyut per menit (bpm). Oleh karena itu, penggabungan data suhu dan detak

jantung diharapkan dapat meningkatkan validitas deteksi dalam menentukan apakah seorang praktikan berada dalam kondisi sakit.

Dalam implementasinya, penggunaan sensor *pulse oximeter* memerlukan penanganan khusus karena karakteristik sinyal *photoplethysmogram* (PPG) yang dihasilkan cenderung rentan terhadap *noise* dan gangguan gerak (*motion artifact*). Untuk mengatasi kendala ini, metode *Digital Signal Processing* (DSP) diterapkan sebagai tahapan pra-pemrosesan data (*pre-processing*). Teknik filtrasi sinyal yang merujuk pada penelitian Elgendi [16] digunakan untuk membersihkan sinyal dari derau sehingga akurasi pembacaan detak jantung dapat terjamin.



Gambar 1. 7 Photoelectric Plethysmography Process

Data suhu dan data detak jantung yang telah melalui proses stabilisasi tersebut kemudian menjadi variabel input bagi sistem *Fuzzy Logic*. Metode logika fuzzy ini berfungsi sebagai pusat pengambilan keputusan (*decision support system*) untuk mengklasifikasikan status kesehatan praktikan secara presisi berdasarkan kombinasi kedua parameter vital tersebut.

Keunggulan utama dari pendekatan ini terletak pada peningkatan reliabilitas dan akurasi sistem deteksi melalui pemantauan multi-parameter. Dengan mengintegrasikan dua indikator klinis vital sekaligus, yaitu suhu tubuh dan frekuensi denyut jantung, sistem mampu melakukan analisis kondisi kesehatan yang lebih komprehensif dibandingkan metode yang hanya mengandalkan sensor tunggal. Kombinasi ini memungkinkan sistem untuk memvalidasi data; misalnya, jika terdeteksi kenaikan suhu tubuh yang diikuti oleh peningkatan detak jantung (takikardia), sistem memiliki landasan yang kuat untuk menyimpulkan adanya indikasi patologis. Mekanisme verifikasi silang ini secara signifikan dapat meminimalisir kesalahan deteksi (*false positive* atau *false negative*) yang mungkin

timbul akibat anomali pada salah satu sensor. Output dari skrining kesehatan ini adalah tampilan visual hasil skrining dan notifikasi jika ada yang tidak lolos pemeriksaan.

Namun, kelemahan mendasar dari solusi ini berkaitan dengan karakteristik operasional sensor *pulse oximeter* yang bersifat kontak (*contact-based*). Berbeda dengan termometer inframerah, sensor ini mengharuskan adanya sentuhan fisik langsung antara kulit praktikan dengan permukaan sensor untuk mendapatkan sinyal yang valid. Dalam skenario penggunaan massal di pintu masuk laboratorium, metode ini menimbulkan tantangan serius terkait aspek higienitas dan risiko kontaminasi silang (*cross-contamination*). Akumulasi kontak fisik dari banyak pengguna pada satu alat yang sama berpotensi menjadi media transmisi patogen, sehingga menuntut adanya prosedur sanitasi rutin yang dapat memperlambat alur masuk praktikan.

Monitoring suhu dan kualitas udara pada ruang granulasi merupakan langkah penting dalam menjaga konsistensi kondisi lingkungan selama proses pembuatan sediaan padat farmasi. Pada tahap granulasi, parameter lingkungan seperti suhu ruangan dan kandungan partikulat di udara memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat fisik granul, termasuk kadar air, homogenitas, serta potensi kontaminasi produk. Suhu ruangan yang tidak terkontrol dapat menyebabkan ketidakseimbangan kadar air granul, sedangkan peningkatan partikulat di udara dapat menjadi sumber kontaminasi silang serta risiko kesehatan bagi operator. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem yang mampu memantau kondisi lingkungan ruang granulasi secara kontinu.

Sistem yang diusulkan dalam penelitian ini dirancang khusus sebagai sistem monitoring, tanpa melakukan tindakan pengendalian otomatis terhadap lingkungan. Parameter yang dimonitor meliputi suhu ruangan sebagai indikator kondisi termal, serta kualitas udara yang direpresentasikan oleh konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10. Pemilihan parameter partikulat didasarkan pada karakteristik partikel berukuran mikrometer yang mudah melayang di udara dan berpotensi masuk ke dalam granul selama proses berlangsung. Untuk memperoleh data lingkungan secara real-time, digunakan sensor suhu digital dan sensor partikulat berbasis

prinsip laser scattering yang mampu memberikan hasil pengukuran kontinu dengan tingkat akurasi yang memadai.

Data hasil pengukuran sensor dikirim ke mikrokontroler untuk diproses dan ditampilkan sebagai informasi kondisi lingkungan ruang granulasi. Dalam sistem ini, metode threshold digunakan sebagai mekanisme evaluasi kondisi lingkungan, bukan sebagai dasar pengendalian. Metode threshold bekerja dengan cara membandingkan nilai pengukuran sensor dengan nilai ambang batas yang telah ditentukan sebelumnya berdasarkan standar operasional atau referensi teknis. Nilai ambang batas ini berfungsi sebagai indikator klasifikasi kondisi lingkungan, apakah masih berada dalam kondisi aman atau telah mengalami penyimpangan.

Pada proses pengolahan data, sistem melakukan pembacaan sensor secara periodik dan dapat menerapkan penyaringan data sederhana untuk mengurangi fluktuasi pembacaan sesaat. Nilai hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan nilai threshold yang telah ditetapkan. Apabila nilai suhu dan konsentrasi partikulat masih berada dalam rentang ambang batas, sistem akan menampilkan status kondisi ruangan sebagai normal. Sebaliknya, jika salah satu parameter melebihi nilai threshold, sistem akan menandai kondisi tersebut sebagai peringatan atau tidak sesuai. Informasi ini disajikan kepada pengguna melalui tampilan visual atau dashboard monitoring sebagai bentuk peringatan dini.

Pemilihan metode threshold pada sistem monitoring ini didasarkan pada kebutuhan akan metode evaluasi yang sederhana, transparan, dan mudah dipahami oleh pengguna. Metode threshold menghasilkan klasifikasi kondisi yang jelas dan konsisten, sehingga memudahkan proses pencatatan, analisis, dan evaluasi kondisi lingkungan ruang granulasi. Selain itu, pendekatan ini sesuai dengan prinsip Good Manufacturing Practice (GMP) yang menekankan kejelasan batas parameter lingkungan serta kemudahan dalam pelacakan data historis.

Dengan demikian, sistem monitoring suhu dan kualitas udara ruang granulasi berbasis metode threshold berfungsi sebagai alat bantu pengawasan lingkungan yang efektif. Sistem ini memungkinkan deteksi dini terhadap penyimpangan kondisi lingkungan tanpa melakukan intervensi langsung terhadap proses produksi, sehingga operator dapat mengambil keputusan yang tepat berdasarkan informasi yang akurat dan terdokumentasi. Pendekatan ini diharapkan dapat mendukung

upaya penjaminan mutu proses granulasi serta meningkatkan keselamatan dan kenyamanan kerja di lingkungan laboratorium farmasi.

Sistem pengukuran dimensi tablet atau kapsul ini menggunakan kombinasi kamera digital dan modul *line laser* sebagai unit akuisisi data utama. Penggunaan teknologi berbasis visi (*vision-based*) dengan pencahayaan laser terstruktur dipilih karena mampu menghasilkan pengukuran yang presisi melalui analisis geometri pada citra digital. Metode ini memberikan keunggulan dalam hal fleksibilitas pengukuran berbagai bentuk tablet dan kemampuan deteksi visual yang komprehensif, khususnya pada lingkungan laboratorium yang terkontrol.

Prinsip kerja sistem didasarkan pada teknik triangulasi optik menggunakan proyeksi garis cahaya dari *line laser* yang dipasang pada sudut α dan β terhadap objek pengukuran. *Line laser* memproyeksikan garis cahaya lurus pada permukaan tablet, sementara kamera digital menangkap deformasi visual atau perubahan bentuk garis tersebut saat mengenai objek. Tablet atau kapsul ditempatkan pada dudukan presisi (*cavity*) yang dirancang untuk menjaga posisi objek tetap stabil dan memastikan tablet berada pada bidang fokus kamera (*focal plane*) secara konsisten.

Untuk pengukuran ketebalan, sistem memanfaatkan prinsip triangulasi optik di mana kamera mendeteksi pergeseran piksel (*pixel displacement*) garis laser akibat ketinggian objek. Sistem terlebih dahulu melakukan proses kalibrasi dengan mengukur posisi garis laser pada permukaan referensi datar sebagai titik dasar (*baseline*). Ketika tablet ditempatkan pada dudukan, perpindahan posisi garis laser yang tertangkap kamera dihitung menggunakan algoritma geometri untuk menentukan nilai ketebalan secara akurat. Perlu ditekankan bahwa data yang diolah adalah data visual (piksel), sehingga tidak melibatkan pemrosesan sinyal frekuensi (*Digital Signal Processing*).

Sementara itu, pengukuran diameter dilakukan melalui analisis deteksi tepi (*edge detection*) pada citra digital yang dihasilkan kamera. Proyeksi *line laser* membantu menciptakan kontras yang tajam antara tepi tablet dengan latar belakang, memungkinkan algoritma pemrosesan citra untuk mengidentifikasi batas (*boundary*) tablet dengan presisi tinggi. Sistem menganalisis profil tablet yang tertangkap kamera untuk mengidentifikasi titik-titik tepi dan menghitung diameter

maksimal, terutama pada sediaan berbentuk *biconvex* yang umum dijumpai pada industri farmasi.

Kedua parameter dimensi (diameter dan ketebalan) diperoleh secara simultan dalam satu kali pengambilan gambar (*single-shot acquisition*). Hal ini membuat waktu pengukuran menjadi sangat singkat dan efisien, yaitu sekitar 0,5–1,0 detik untuk setiap tablet, termasuk waktu pemrosesan data. Efisiensi ini memungkinkan sistem untuk diaplikasikan pada pengujian dengan beban kerja tinggi (*high throughput*). Dudukan berbentuk *cavity* presisi memastikan konsistensi posisi tablet agar selalu optimal terhadap pencahayaan laser dan sudut pandang kamera.

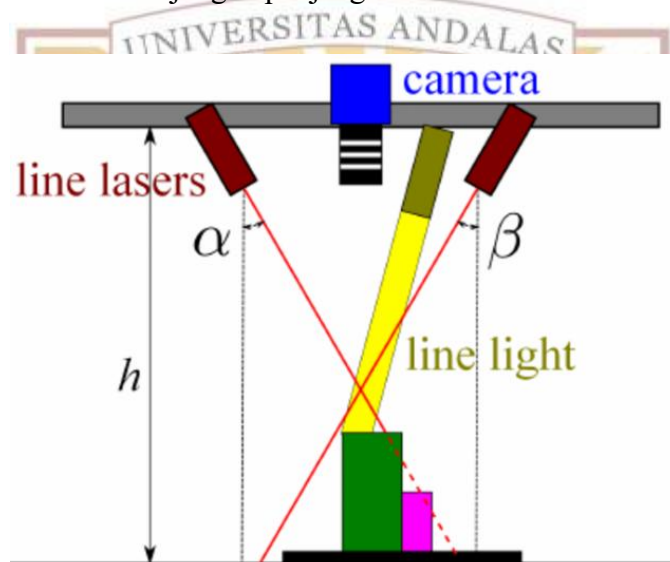
Dari sisi pemrosesan data, citra digital dari kamera dikirimkan ke unit pemroses (*embedded computer*) sebagai pengendali utama. Sistem menjalankan tahapan pemrosesan citra yang meliputi reduksi *noise*, deteksi tepi, dan analisis geometris untuk mengekstrak nilai dimensi tablet. Algoritma triangulasi geometris yang telah dikalibrasi digunakan untuk mengonversi nilai piksel menjadi satuan fisik milimeter secara otomatis. Hasil akhir berupa nilai diameter dan ketebalan ditampilkan secara *real-time* melalui antarmuka pengguna, sehingga operator dapat segera mengetahui status kelayakan sediaan (*pass/fail*) berdasarkan batas toleransi yang ditetapkan.

Keunggulan utama sistem ini terletak pada kecepatan pengukuran yang tinggi, kesederhanaan mekanis, serta akurasi yang konsisten. Dengan memanfaatkan modul *line laser* sebagai referensi visual dan dudukan presisi tanpa melibatkan komponen sensor yang bergerak aktif, sistem memberikan solusi pengukuran yang andal dan mudah dirawat. Pendekatan ini sekaligus memperkaya variasi metode pengukuran dalam penelitian laboratorium melalui eksplorasi teknologi digital terapan.

Secara keseluruhan, integrasi subproses ini merealisasikan konsep ekosistem laboratorium cerdas yang adaptif. Seluruh aliran data yang heterogen—mulai dari verifikasi kepatuhan APD, parameter kesehatan pengguna, hingga presisi dimensi tablet—diakuisisi dan divisualisasikan secara terpusat melalui *dashboard* aplikasi *mobile*. Penggunaan platform *mobile* memberikan fleksibilitas akses,

memungkinkan pengelola laboratorium memantau kondisi operasional secara komprehensif tanpa terikat pada lokasi fisik stasiun kerja.

Selanjutnya, sistem ini juga dilengkapi dengan mekanisme peringatan aktif. Selain melalui indikator fisik seperti *buzzer* dan LED, fitur *push notification* digunakan untuk mendeteksi anomali secara *real-time*, seperti ketidakpatuhan prosedur keselamatan atau penyimpangan dimensi produk. Kapabilitas ini memastikan respons cepat terhadap kendala teknis, sekaligus membentuk basis data digital (*digital log*) yang penting bagi manajemen laboratorium dalam melakukan evaluasi kepatuhan dan analisis tren jangka panjang berbasis data.



Gambar 1. 8 Pengukuran Obat

1.2.2.3 Solusi 3: Pendeteksi Kelengkapan APD Berbasis Smart Locker, Penggunaan Kamera dengan Metode Deep Learning untuk deteksi wajah praktikan yang tidak fit, Pengendalian Suhu dan Kualitas Udara Menggunakan Temperature Sensor dan Particulate Matter Sensor Berbasis Analisis Tren Waktu, Pengukuran dimensi tablet/kapsul menggunakan sistem mekanik terotomasi berbasis aktuator linear

Sistem yang diusulkan dirancang sebagai satu kesatuan arsitektur *Smart Laboratory Station* yang mengintegrasikan empat fungsi utama: deteksi APD, skrining kesehatan, monitoring lingkungan, dan pengukuran dimensi obat. Seluruh sub-

sistem ini terhubung pada unit pemrosesan pusat yang mengatur alur logika perizinan masuk (*gate control*) serta sentralisasi data pada dashboard monitoring Sistem pendeteksi kelengkapan Alat Pelindung Diri (APD) berbasis smart locker diusulkan sebagai solusi untuk meningkatkan kepatuhan penggunaan APD serta mengendalikan akses praktikan ke laboratorium sediaan padat. Pada kondisi saat ini, penggunaan APD masih sangat bergantung pada kedisiplinan individu dan pengawasan manual, sehingga berpotensi menimbulkan ketidaksesuaian standar keselamatan laboratorium. Pendekatan smart locker memungkinkan proses distribusi dan verifikasi APD dilakukan secara terstruktur sebelum praktikan memasuki laboratorium[35].

Solusi ini memanfaatkan loker pintar yang menyimpan APD wajib, seperti jas laboratorium, masker, dan sarung tangan. Setiap loker dilengkapi dengan sensor untuk mendeteksi apakah APD telah diambil. Sistem dikonfigurasi agar akses ke area laboratorium hanya diberikan setelah seluruh kompartemen APD wajib terdeteksi telah diakses sesuai ketentuan.

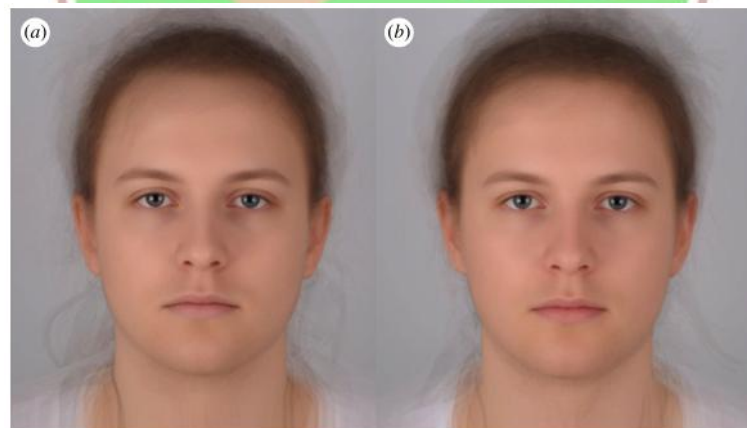
Dari sisi sistem, proses dimulai ketika praktikan mengambil APD dari loker. Sensor pada masing-masing kompartemen akan mengirimkan status pengambilan APD ke unit pengendali. Data tersebut kemudian diproses untuk memverifikasi kelengkapan APD. Apabila seluruh APD telah terdeteksi diambil, sistem memberikan sinyal izin masuk; sebaliknya, jika masih terdapat APD yang belum diambil, sistem akan menampilkan peringatan visual atau suara sebagai pengingat.

Keunggulan sistem smart locker terletak pada kemampuannya mengintegrasikan fungsi penyimpanan, distribusi, dan verifikasi APD secara fisik, tanpa bergantung pada identitas digital atau teknologi pembaca tertentu. Selain meningkatkan kepatuhan penggunaan APD, sistem ini juga membantu pengelolaan stok APD secara lebih tertib. Seluruh aktivitas pengambilan dapat dicatat secara otomatis untuk keperluan evaluasi dan dokumentasi.



Gambar 1. 9 Contoh Smart Locker

Solusi berikutnya yaitu penggunaan kamera. Aspek klinis lain yang dapat dijadikan parameter adalah rona wajah. Orang yang sedang sakit cenderung memiliki wajah lelah dan mengantuk. Kondisi patologis pada tubuh manusia tidak hanya termanifestasi melalui parameter vital internal, tetapi juga melalui perubahan morfologi wajah yang dapat diamati secara visual. Studi yang dilakukan oleh Axelsson dkk. [17] membuktikan bahwa respons sistem imun terhadap infeksi menyebabkan perubahan signifikan pada fitur wajah hanya dalam waktu dua jam setelah induksi penyakit.



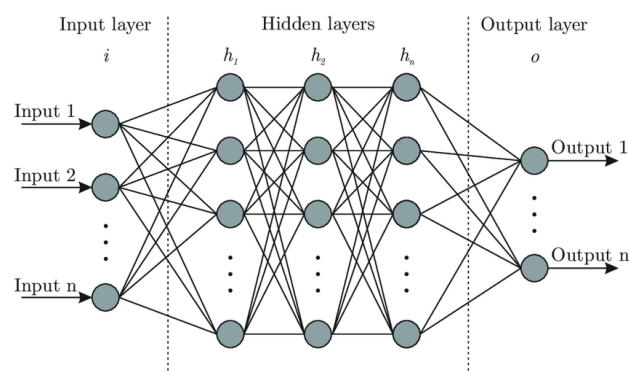
Gambar 1. 10 Gambar rata-rata dari 16 individu (delapan wanita) yang difoto dua kali dalam desain silang, selama kondisi sakit akut yang diinduksi secara eksperimental (a) dan (b) plasebo.

Penelitian tersebut menemukan bahwa individu yang sakit menunjukkan tanda-tanda visual yang konsisten, meliputi kulit dan bibir yang memucat, mata yang memerah, serta wajah yang terlihat lebih bengkak. Secara spesifik, penelitian ini

menyoroti bahwa penampilan yang 'terlihat lelah' (*tired appearance*) merupakan indikator kuat dari kondisi sakit. Hal ini ditandai dengan fitur *hanging eyelids* (kelopak mata yang turun atau sayu), yang secara statistik menjadi salah satu prediktor paling akurat dalam mendeteksi individu yang sedang mengalami respons imun aktif. Oleh karena itu, deteksi fitur kelelahan pada wajah—seperti mata yang sayu—dapat dijadikan variabel pendukung yang valid untuk mengidentifikasi kondisi kesehatan praktikan.

Untuk dapat mendeteksi wajah praktikan yang sakit digunakan metode komputasi deep learning. Sistem yang dikembangkan merupakan sistem pemantauan cerdas berbasis visi komputer (*Computer Vision*) yang beroperasi menggunakan kamera sebagai sensor tunggal. Berbeda dengan sistem konvensional yang mengandalkan sensor kontak fisik, sistem ini memanfaatkan kamera untuk memantau kondisi kesehatan dan keselamatan praktikan secara nirkontak (*non-contact*). Kamera berfungsi untuk merekam citra wajah praktikan secara *real-time* guna mendeteksi indikator visual kondisi tubuh yang menurun, seperti tanda-tanda kelelahan ekstrem (*fatigue*) atau wajah yang tampak sakit (*sick appearance*), serta memverifikasi kelengkapan alat pelindung diri seperti masker.

Penempatan kamera dilakukan pada posisi strategis agar mampu mencakup area wajah praktikan dengan resolusi dan pencahayaan yang optimal. Data visual yang diperoleh dari kamera kemudian diolah menggunakan metode *Deep Learning*. Pendekatan ini dipilih karena kamera, meskipun memiliki kemampuan menangkap citra layaknya mata manusia, memerlukan algoritma cerdas untuk "memahami" konteks gambar tersebut. Untuk mencapai kemampuan persepsi ini, sistem dilatih menggunakan arsitektur *Artificial Neural Network* (ANN).



Gambar 1. 11 Arsitektur ANNs

Artificial Neural Networks (ANN) adalah model komputasi yang terdiri dari neuron-neuron yang saling terhubung, bertugas mengambil input data visual dan memprosesnya melalui serangkaian lapisan (*layers*). Ketika ANN memiliki struktur yang kompleks dengan dua atau lebih lapisan tersembunyi (*hidden layers*), arsitektur tersebut digolongkan sebagai *Deep Learning* atau *Deep Neural Network* [18]. Struktur inilah yang memungkinkan sistem membedakan fitur halus pada wajah—seperti kelopak mata yang turun (*hanging eyelids*) atau kulit yang pucat—yang menjadi indikator seseorang sedang sakit.

Deep Learning merupakan bagian dari kecerdasan buatan dan pengembangan lanjut dari *Machine Learning* yang dirancang untuk memberikan ketepatan tinggi dalam tugas persepsi visual, seperti deteksi objek dan klasifikasi wajah. Berbeda dengan teknik *Machine Learning* tradisional yang bergantung pada rekayasa fitur manual, *Deep Learning* secara otomatis melakukan ekstraksi dan representasi fitur dari data mentah (gambar/video) tanpa memerlukan definisi aturan yang kaku dari manusia [19].

Penerapan pendekatan *Deep Learning* berbasis ANN memungkinkan sistem untuk mempelajari pola visual kompleks yang berkaitan dengan kondisi fisiologis manusia. Dalam konteks penelitian ini, kemampuan tersebut dimanfaatkan untuk *object detection* dan analisis kesehatan visual, di mana sistem mendeteksi anomali pada wajah praktikan sebagai substitusi dari pengukuran suhu fisik, sehingga proses pemantauan kesehatan dapat dilakukan secara lebih praktis, cepat, dan higienis.

Mengingat sistem ini memanfaatkan teknologi *Computer Vision* untuk memproses data biometrik wajah, perancangan sistem berkomitmen untuk mematuhi ketentuan Undang-Undang Nomor 27 Tahun 2022 tentang Perlindungan Data Pribadi (UU PDP), khususnya BAB V yang mengatur mengenai kewajiban pemrosesan data. Karena data citra wajah dikategorikan sebagai Data Pribadi Spesifik yang memerlukan perlindungan ekstra, penelitian ini menerapkan prinsip *Privacy by Design* secara ketat. Implementasi prinsip ini mencakup mekanisme pengambilan data visual yang wajib didasarkan pada persetujuan eksplisit (*explicit consent*) dari praktikan. Selain itu, untuk meminimalisasi risiko (*data minimization*), data visual tidak disimpan dalam bentuk citra mentah jangka panjang, melainkan diproses secara *real-time* dan segera dimusnahkan setelah status kesehatan terverifikasi.

Lebih lanjut, sistem juga menerapkan enkripsi pada penyimpanan data sementara guna menjamin keamanan dan kerahasiaan data praktikan sesuai dengan amanat Pasal 35 UU PDP. Output dari pendeteksian wajah yang sakit ini nantinya akan menggunakan tampilan visual disertai dengan hasil klasifikasi apakah praktikan sedang sakit atau tidak. Jika terdeteksi praktikan sakit maka akan diberi notifikasi. Monitoring kondisi lingkungan merupakan aspek penting dalam menjamin kestabilan aktivitas di ruang kerja laboratorium dan area proses. Parameter lingkungan seperti suhu dan kualitas udara memiliki pengaruh langsung terhadap kenyamanan, keselamatan, serta keandalan aktivitas yang berlangsung di dalam ruangan. Perubahan kondisi lingkungan yang tidak terpantau dengan baik dapat menimbulkan gangguan kesehatan bagi pengguna ruang, menurunkan kualitas proses, serta meningkatkan risiko kontaminasi. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem yang mampu memantau kondisi lingkungan secara kontinu dan memberikan peringatan dini terhadap potensi penyimpangan.

Sistem yang diusulkan dirancang untuk melakukan monitoring suhu dan kualitas udara secara real-time dengan memanfaatkan sensor lingkungan yang bekerja secara non-invasif. Suhu ruangan digunakan sebagai indikator kondisi termal, sedangkan kualitas udara direpresentasikan oleh konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10 yang umum digunakan sebagai parameter evaluasi kebersihan udara dalam ruangan. Partikulat berukuran halus memiliki kemampuan melayang dalam waktu lama dan mudah terhirup, sehingga peningkatan konsentrasinya dapat berdampak pada kesehatan pengguna ruang serta kualitas lingkungan kerja secara umum. Pemantauan parameter ini secara kontinu memungkinkan identifikasi perubahan kondisi lingkungan yang tidak dapat ditangkap melalui pengukuran sesaat.

Data hasil pengukuran sensor dicatat secara periodik dan disimpan sebagai data deret waktu yang menggambarkan dinamika perubahan kondisi lingkungan. Berbeda dengan sistem monitoring konvensional yang hanya menampilkan nilai sesaat, pendekatan berbasis analisis tren waktu memungkinkan evaluasi pola perubahan data dalam interval tertentu. Dengan mengamati kecenderungan naik, turun, atau stabil dari parameter suhu dan partikulat, sistem dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi lingkungan ruangan.

Analisis tren waktu digunakan sebagai dasar mekanisme peringatan dini dalam sistem ini. Peringatan tidak hanya dihasilkan ketika nilai pengukuran melewati ambang batas tertentu, tetapi juga ketika data menunjukkan kecenderungan menuju kondisi yang tidak diinginkan. Sebagai contoh, kenaikan suhu yang terjadi secara bertahap dalam periode waktu tertentu dapat diidentifikasi sebagai indikasi awal gangguan kondisi termal, meskipun nilai suhu belum melampaui batas maksimum yang ditetapkan. Demikian pula, peningkatan konsentrasi partikulat yang konsisten dapat menjadi sinyal awal penurunan kualitas udara. Informasi peringatan ini disajikan kepada pengguna melalui tampilan monitoring atau notifikasi sebagai bahan evaluasi dan pengambilan keputusan.

Pemilihan analisis tren waktu didasarkan pada kebutuhan sistem monitoring yang bersifat proaktif dan informatif. Pendekatan ini memungkinkan pengguna untuk memahami dinamika perubahan kondisi lingkungan secara berkelanjutan, bukan hanya bereaksi terhadap kondisi kritis. Selain itu, pencatatan dan analisis data historis mendukung proses evaluasi lingkungan secara sistematis serta memudahkan penelusuran apabila terjadi penyimpangan. Dengan demikian, sistem monitoring dan peringatan dini berbasis analisis tren waktu dapat berfungsi sebagai alat bantu pengawasan lingkungan yang andal, fleksibel.

Sistem pengukuran dimensi tablet atau kapsul dikembangkan menggunakan pendekatan mekanik terotomasi berbasis dua aktuator linear sebagai metode pengukuran kontak yang terkontrol[51]. Pendekatan ini mengadopsi prinsip dasar alat ukur mekanik konvensional, seperti jangka sorong dan mikrometer, namun diintegrasikan dengan sistem aktuasi listrik dan pemrosesan digital. Dengan konfigurasi ini, proses pengukuran tidak lagi bergantung pada keterampilan operator, sehingga kesalahan pembacaan manual dapat diminimalkan, hasil pengukuran menjadi lebih presisi, dan repeatability meningkat secara signifikan.

Tablet atau kapsul ditempatkan padaudukan tetap (fixed base) yang berfungsi sebagai referensi posisi. Sistem dilengkapi dengan dua aktuator linear yang dipasang pada arah berbeda: satu aktuator vertikal untuk pengukuran ketebalan dan satu aktuator horizontal untuk pengukuran diameter. Masing-masing aktuator digerakkan oleh motor stepper melalui mekanisme lead screw, sehingga pergerakan probe dapat dikontrol secara perlahan dan presisi. Sensor displacement linear

terkalibrasi digunakan untuk merekam posisi aktuator secara real-time, memungkinkan perhitungan dimensi tablet secara langsung.

Proses pengukuran dilakukan secara otomatis dan berurutan. Aktuator vertikal bergerak turun hingga probe menyentuh permukaan atas tablet dengan gaya tekan yang terkontrol. Posisi aktuator saat kontak dicatat sebagai $x_{contact}$, sementara posisi baseline dudukan kosong dicatat sebagai $x_{baseline}$. Ketebalan tablet t dihitung menggunakan persamaan:

$$t = x_{contact} - x_{baseline} \quad .[\text{Persamaan 1. 4}]$$

Setelah pengukuran ketebalan selesai dan aktuator vertikal kembali ke posisi awal, aktuator horizontal bergerak menuju sisi tablet untuk mengukur diameter dengan prinsip kontak lateral yang serupa. Jika pengukuran dilakukan dari satu sisi tablet, diameter DDD dapat dihitung sebagai:

$$D = 2(x_{contact} - x_{baseline}) \quad [\text{Persamaan 1. 5}]$$

Untuk pengukuran lebih presisi dari kedua sisi, diameter juga dapat ditentukan menggunakan:

$$D = x_{contact\ left} + x_{contact\ right} - 2x_{baseline} \quad [\text{Persamaan 1.6}]$$

Perpindahan aktuator dikonversi menjadi satuan milimeter berdasarkan pitch ulir lead screw $pleadscrew$ dan resolusi stepper motor $n_{microstep}$ melalui persamaan:

$$\Delta x_{mm} = N_{steps} \cdot \frac{pleadscrew}{n_{microstep}} \quad [\text{Persamaan 1.7}]$$

Mikrokontroler berperan sebagai unit pengendali utama, mengkoordinasikan gerakan kedua aktuator dan memproses data posisi dari sensor displacement. Data tersebut diolah untuk menghasilkan nilai ketebalan t dan diameter D , yang kemudian ditampilkan secara real-time pada layar LCD. Sistem ini memungkinkan operator langsung memonitor hasil pengukuran dan menentukan kelayakan tablet berdasarkan batas toleransi yang telah ditentukan.

Keunggulan utama sistem aktuator linear ganda ini terletak pada presisi tinggi, repeatability, dan kecepatan pengukuran, karena pengukuran dilakukan berdasarkan perpindahan mekanik yang terkalibrasi secara digital[52]. Sistem tidak terpengaruh oleh kondisi pencahayaan atau karakteristik permukaan tablet, seperti yang kerap

menjadi kendala pada metode berbasis kamera. Penggunaan gaya tekan yang sangat rendah memastikan tablet tidak mengalami deformasi, meskipun pengukuran bersifat kontak langsung. Dengan demikian, sistem ini menawarkan solusi pengukuran dimensi tablet yang akurat, cepat, andal, dan mudah diintegrasikan dalam proses laboratorium atau produksi, sekaligus memberikan alternatif metode pengukuran yang representatif untuk penelitian dan perbandingan teknologi pengukuran.

Secara keseluruhan, integrasi dari keempat subproses ini merealisasikan konsep ekosistem laboratorium cerdas yang adaptif. Seluruh aliran data yang heterogen—mulai dari deteksi pelanggaran APD, parameter kesehatan pengguna, indeks kualitas udara ruang granulasi, hingga presisi dimensi tablet—diakuisisi dan divisualisasikan secara terpusat melalui dashboard berbasis aplikasi mobile. Penggunaan platform mobile ini dirancang untuk memberikan fleksibilitas akses yang tinggi, memungkinkan pengelola laboratorium memantau dinamika kondisi operasional secara komprehensif tanpa terikat pada lokasi stasiun kerja fisik.

Selanjutnya, sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan pasif, tetapi juga dilengkapi dengan mekanisme peringatan aktif. Selain melalui buzzer dan led, digunakan juga fitur push notification yang bekerja di latar belakang, sistem mampu mendeteksi anomali secara real-time—seperti penurunan kualitas udara yang ekstrem atau ketidakpatuhan prosedur keselamatan—dan mengirimkan peringatan instan kepada pengguna. Kapabilitas ini memastikan respons cepat terhadap potensi bahaya, sekaligus membentuk basis data digital (digital log) yang penting bagi manajemen laboratorium dalam melakukan evaluasi kepatuhan dan analisis tren jangka panjang berbasis data.

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Tabel 1. 6 House of Quality

Karakteristik Produk		Korrelasi						Importance Rating		Solusi		
		Multi-Object Detection and Measurement	Health & Environmental Screening	Integration Capability and Notification System	Operational Duration	Computing Performance & Latency	Importance Rating					
Konstrain	Priority											
Sistem mampu memberikan respons dalam waktu <7 detik	3 14%	●	△	○	○	○	51	14%	●	○	△	
Sistem mampu menjaga suhu pada rentang 18°C-30°C	5 23%	△	○	○	△	○	65	17%	○	○	○	●
Sistem mampu beroperasi secara kontinyu (8 jam) dengan suhu <80°C	3 14%	○	○	●	●	●	63	17%	●	●	○	○
Sistem memiliki dimensi maksimal 50 cm x 50 cm dengan desain modular	1 5%	○	○	△	△	○	13	3%	○	○	△	○
Sistem mampu memberikan hasil deteksi dengan akurasi 80% dan selisih maksimal 0,5°C	5 23%	●	●	●	○	○	105	28%	○	△	○	○
Sistem mampu memberikan hasil pengukuran tablet dengan penyimpangan 5% dan resolusi 0,1 mm	5 23%	●	△	○	○	○	75	20%	○	○	○	○
Jumlah	22 100%						372	100%	5	3,177	3,57	
Importance Rating		82	70	80	60	80	372					
Percentage Rating		22,04%	18,82%	21,51%	16,13%	21,51%	100%					
Solusi 1		○	○	○	○	○	5					
Solusi 2		○	○	○	○	○	5					
Solusi 3		○	○	○	○	○	5					

Tabel 1. 7 Keterangan Hubungan Simbol HoQ

Simbol	Nilai	Hubungan
●	5	Berhubungan erat
○	3	Berhubungan normal
△	1	Berhubungan jauh
Kosong	0	Tidak berhubungan

Berdasarkan Tabel 1.6, terdapat skenario mengenai hubungan antara karakteristik produk, konstrain, dan usulan solusi.

1. Hubungan karakteristik produk dengan konstrain

Konstrain pada aspek kesehatan dan regulasi bertanggung jawab langsung atas presisi pengukuran dimensi obat. Jika algoritma salah hitung, produk yang cacat akan lolos uji. Hal ini sesuai dengan standar Farmakope Indonesia Ed. VI dan USP. Keseragaman dimensi adalah atribut kualitas kritis. Algoritma harus divalidasi untuk memastikan error pengukuran tetap di bawah toleransi.

Konstrain aspek etika dan keselamatan harus mampu membedakan antara orang memakai masker dan tidak serta membedakan orang sakit dan tidak. Kegagalan deteksi berarti melanggar protokol keselamatan sebagai mana terdapat pada CPOB/GMP BAB Personalia dimana sistem otomatisasi

pengawasan harus memiliki tingkat kesalahan (False Negatif) yang sangat rendah untuk menjadwalkan higiene ruang produksi. Kecepatan algoritma dalam memproses banyak objek sekaligus menentukan apakah target waktu < 7 detik tercapai. Kompleksitas deteksi berbanding terbalik dengan kecepatan.

Konstrain lingkungan adalah penentu utama apakah sistem bisa memantau kondisi ruang sesuai standar penyimpanan obat sesuai dengan standar USP. Sistem harus mampu mendeteksi ekskursi suhu dengan akurasi tinggi agar kualitas obat tidak rusak secara kimiawi. Akurasi sensor untuk deteksi sakit vital untuk menjaga praktikan yang sakit masuk ke area steril pengendalian akses berdasarkan kondisi kesehatan personil adalah lapisan pertahanan utama terhadap kontaminasi biologis sesuai dengan WHO Laboratory Biosafety Manual.

Konstrain sustainability dan etika memiliki hubungan kuat dengan integration capability & notification system karena kemampuan sistem mengirim data ke database tanpa terputus menjamin kelengkapan rekam jejak. Sistem notifikasi memastikan respon cepat, menjaga keberlanjutan operasi laboratorium sesuai dengan standar FDA 21 CFR Part 11 dan GAMP 5 tentang integritas data elektronik. Sistem notifikasi adalah mekanisme eksekusi dari aturan keselamatan. Tanpa integritas ini, deteksi bahaya hanya menjadi data pasif, bukan tindakan pencegahan aktif.

Konstrain sustainability memiliki hubungan kuat dengan operational duration karena berhubungan langsung dengan manajemen daya dan stabilitas sistem. Sistem harus bertahan minimal selama shift kerja laboratorium.

Computing performance memiliki hubungan yang kuat dengan konstrain ekonomi, sustainability, dan manufakturabilitas. Spesifikasi sistem dan optimasi latensi menentukan throughput sistem. Performa komputasi rendah menyebabkan bottleneck, membuat proses pengukuran menjadi lama dan tidak efisien secara ekonomi. Performa komputasi tinggi menghasilkan panas. Jika letensi ditekan dengan memaksa CPU bekerja 100% terus-menerus, risiko overheat meningkat, yang akan mematikan sistem sehingga

mengganggu durabilitas sistem. Komputasi tinggi memerlukan pendingin yang besar, yang bertentangan dengan desain compact. Pemilihan compute module yang efisien adalah solusi menyeimbangkan performa dengan dimensi fisik.

2. Hubungan karakteristik produk dan solusi

Solusi 1 menunjukkan hubungan yang sangat kuat dan merata terhadap kelima fitur utama, yaitu *Multi-Object Detection*, *Health Screening*, *Integration*, *Operational Duration*, dan *Computing Performance*. Solusi ini dirancang sebagai sistem yang paling komprehensif (paket lengkap) di mana kemampuan komputasi dan deteksi objek menjadi prioritas tertinggi untuk memenuhi standar performa "all-in-one station".

Solusi 2 juga memiliki hubungan yang kuat dengan semua fitur utama, mirip dengan Solusi 1. Hal ini karena Solusi 2 tetap dituntut untuk menyajikan fungsi-fungsi utama tersebut (skrining dan deteksi) kepada pengguna, meskipun mungkin dengan pendekatan teknis yang berbeda di balik layar. Fokus utamanya tetap pada penyajian data kesehatan dan lingkungan yang terintegrasi.

Solusi 3 memiliki pola hubungan yang sama kuatnya dengan fitur utama *Integration Capability* dan *Computing Performance*. Meskipun mungkin menggunakan metode mekanik atau otomatisasi, solusi ini tetap memprioritaskan hasil akhir berupa data yang terintegrasi ke dashboard, sehingga hubungan dengan fitur utama integrasi tetap dinilai tinggi (poin penuh).

3. Hubungan konstrain dan solusi

Solusi 1 memiliki keterhubungan dengan konstrain etika dan keselamatan. Computer Vision mampu memverifikasi apakah APB benar-benar dipakai, bukan sekedar dibawa. Berdasarkan referensi, pemantauan berbasis computer vision meningkatkan kepatuhan penggunaan APD hingga 85% lebih efektif dibandingkan metode manual, sesuai dengan prinsip CPOB tentang disiplin personel. Solusi ini juga memiliki keterhubungan dengan regulasi yaitu pengukuran dimensi obat menggunakan computer vision bersifat *non-contact*. Ini mencegah kontaminasi fisik atau kerusakan tablet

yang sering terjadi pada pengukuran mekanik. Hal ini sesuai dengan standar dari USP tentang tablet Breaking Force. Metode non-kontak menjamin integritas fisik sampel tetap utuh selama pengujian. Hubungan kuat juga dengan sustainabilitas karena minim komponen bergerak, risiko keausan sangat rendah. Sistem digital lebih robust untuk jangka panjang.

Solusi 2 memiliki keterhubungan lemah dengan konstrain etika dan keselamatan. RFID hanya mendeteksi keberadaan tag, bukan pemakaian. Praktikan bisa saja mengantongi masker yang ditempel tag RFID tanpa memakainya sehingga bisa menjadi celah fatal dalam biosafety (WHO Laboratory Biosafety Manual). Keterhubungan dengan konstrain ekonomi sedang. Penggunaan tag RFID setiap jas lab atau masker merupakan consumable cost (biaya habis pakai) yang terus-menerus, bertentangan dengan prinsip efisiensi biaya operasional jangka panjang. Konstrain regulasi memiliki keterhubungan yang kuat karena laser DSP sangat presisi untuk dimensi. Namun, kompleksitas sinyal DSP membutuhkan prosesor lebih mahal.

Solusi 3 memiliki keterhubungan yang lemah dengan konstrain ekonomi karena aktuator linear membutuhkan waktu untuk bergerak maju-mundur saat menjepit tablet. Ini jauh lebih lambat sehingga sulit mencapai respon waktu < 7 detik dibanding kamera yang hitungannya milidetik sesuai dengan prinsip Lean Manufacturing tentang gerakan mekanis yang tidak perlu. Keterhubungan dengan konstrain regulasi di tingkat sedang. Sistem penjepit mekanik berisiko menekan tablet terlalu keras. Jika tablet retak atau gompal saat diukur, maka sampel tersebut rusak. Pengukuran dimensi obat idealnya non-destructive sesuai dengan Farmakope Indonesia VI. Tablet yang diuji keseragaman ukuran sebaiknya tidak mengalami stress fisik yang mengubah strukturnya sebelum uji kekerasan. Keterhubungan dengan konstrain manufakturabilitas sangat rendah. Smart Locker membutuhkan ruang fisik yang besar sehingga melanggar konstrain ini dan sulit diintegrasikan di meja ruang granulasi yang sempit.

Berikut adalah perhitungan untuk keterikatan setiap fitur dengan solusi

1. Karakteristik Produk dengan Solusi :

$$\text{Solusi 1 : } [(5 \times 22,04\%) + (5 \times 18,82\%) + (5 \times 21,51\%) + (5 \times 16,13\%) + (5 \times 21,51\%)] = 5$$

$$\text{Solusi 2 : } [(5 \times 22,04\%) + (5 \times 18,82\%) + (5 \times 21,51\%) + (5 \times 16,13\%) + (5 \times 21,51\%)] = 5$$

$$\text{Solusi 3 : } [(5 \times 22,04\%) + (5 \times 18,82\%) + (5 \times 21,51\%) + (5 \times 16,13\%) + (5 \times 21,51\%)] = 5$$

2. Konstrain dengan Solusi :

$$\text{Solusi 1 : } [(5 \times 14\%) + (5 \times 17\%) + (5 \times 17\%) + (5 \times 3\%) + (5 \times 28\%) + (3 \times 20\%)] = 5$$

$$\text{Solusi 2 : } [(3 \times 14\%) + (3 \times 17\%) + (5 \times 17\%) + (3 \times 3\%) + (1 \times 28\%) + (5 \times 20\%)] = 3,177$$

$$\text{Solusi 3 : } [(1 \times 14\%) + (5 \times 17\%) + (3 \times 17\%) + (1 \times 3\%) + (5 \times 28\%) + (3 \times 20\%)] = 3,57$$

Poin total

$$\text{Solusi 1 : } 10$$

$$\text{Solusi 2 : } 8,177$$

$$\text{Solusi 3 : } 8,57$$



Sehingga, berdasarkan hasil perhitungan tersebut dapat ditentukan solusi yang sesuai untuk penyelesaian masalah yaitu Rancang Bangun *Integrated Smart Station* pada Laboratorium Farmasi Berbasis *Computer Vision* dan *Fuzzy Logic* untuk Pengawasan K3, Lingkungan, dan Pengukuran Dimensi Obat Otomatis.

1.2.4 Solusi yang dipilih

Berdasarkan hasil evaluasi dan pembobotan terhadap tiga usulan solusi, ditetapkan bahwa Solusi 1 terpilih sebagai pendekatan yang paling optimal dengan perolehan skor tertinggi. Solusi ini mengusung konsep Integrated Smart Station yang menggabungkan *Computer Vision* dan *Fuzzy Logic* untuk menyelesaikan permasalahan kompleks di Laboratorium Farmasi, khususnya dalam aspek pengawasan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), pemantauan kondisi lingkungan ruang granulasi, serta otomasi pengukuran dimensi obat. Implementasi computer vision pada solusi ini dilakukan karena benar-benar dibutuhkan untuk meningkatkan efisiensi waktu, kecepatan proses, serta akurasi dan konsistensi hasil, di mana pendeteksian APD dapat dilakukan secara otomatis dan real-time tanpa pengawasan manual, sedangkan pengukuran dimensi tablet yang sebelumnya memerlukan waktu sekitar 20–40 detik per sampel dengan jangka sorong dapat dipercepat menjadi < 3 detik dengan hasil lebih presisi dan minim kesalahan manusia.

Dengan menerapkan solusi ini, sistem memanfaatkan sensor visual (kamera) yang didukung algoritma Deep Learning dan pengolahan citra untuk dua fungsi utama, yaitu memantau kelengkapan APD praktikan (masker, jas lab, dan sarung tangan) secara otomatis serta mengukur dimensi tablet dengan presisi tinggi, sementara metode Fuzzy Logic diterapkan untuk mengolah data dari sensor suhu tubuh dan sensor lingkungan (partikulat debu, suhu, kelembaban) guna memberikan keputusan skrining kesehatan dan kelayakan ruang yang akurat. Seluruh subsistem ini terintegrasi penuh dengan dashboard monitoring berbasis aplikasi mobile yang memberikan notifikasi real-time kepada asisten laboratorium dan mengontrol akses pintu masuk (gate control), sehingga setiap pelanggaran atau ketidaksesuaian standar CPOB (Cara Pembuatan Obat yang Baik) dapat segera ditindaklanjuti.