

KONSEP DASAR FISIKA UNTUK TEKNOLOGI FARMASI



PEMBELAJARAN FARMASI FISIKA BERBASIS STIL

MEIRY AKMARA DHINA, M.PD. - PROF. DR. IDA KANIAWATI, M.SI.
PROF. DR. ADE GAFAR ABDULLAH, M.SI. - PROF. DR. LILIK HASANAH, M.SI.
APT. SRI MARYAM, M.SI.

**PEMBELAJARAN FARMASI FISIKA BERBASIS SOCIO-
TECHNICAL INQUIRY LEARNING (STIL)**

Konsep Dasar Fisika untuk Teknologi Farmasi

Meiry Akmara Dhina, M.Pd

Prof. Dr. Ida Kaniawati, M.Si.

Prof. Dr. Ade Gafar Abdullah, M.Si.

Prof. Dr. Lilik Hasanah, M.Si.

Apt. Sri Maryam, M.Si.

Unfari Press

PEMBELAJARAN FARMASI FISIKA BERBASIS SOCIO- TECHNICAL INQUIRY LEARNING (STIL)

Konsep Dasar Fisika untuk Teknologi Farmasi

Meiry Akmara Dhina, M.Pd

Prof. Dr. Ida Kaniawati, M.Si.

Prof. Dr. Ade Gafar Abdullah, M.Si.

Prof. Dr. Lilik Hasanah, M.Si.

Apt. Sri Maryam, M.Si.

Copyright @2025, pada penulis
Hak cipta dilindungi oleh undang-undang.
Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian
atau seluruh isi buku tanpa izin tertulis dari Penerbit sebagai
pemegang hak publikasi.

Cetakan I, Mei 2025

Editor: Dr. Mochamad Zakaria, S.I.P., M.Si.

Tata Letak: Nurhasanah

Sampul: Nurhasanah

Diterbitkan oleh Unfari Press (Anggota IKAPI)
Jl. Cisaranten Kulon No. 140 Bandung 40293
Telp. 022-7835813 email: unfaripress01@gmail.com

ISBN: XXX-XXX-XXXXX-X-X



KATA PENGANTAR

Fisika merupakan ilmu yang mempelajari sifat-sifat dasar materi dan energi serta interaksinya. Dalam bidang farmasi, pemahaman konsep fisika sangat penting karena hampir semua teknologi farmasi didasarkan pada prinsip-prinsip fisika. Buku ini akan membantu mahasiswa memahami bagaimana konsep fisika dasar diterapkan dalam tiga teknologi farmasi utama: spektrofotometer UV-Vis, viskometer Brookfield, dan mesin cetak tablet.

Framework Socio-Technical Inquiry Learning (STIL) digunakan untuk membantu mahasiswa belajar fisika melalui konteks nyata industri farmasi, sehingga pembelajaran menjadi lebih bermakna dan mudah dipahami. Framework ini mengintegrasikan enam komponen sistem sosio-teknis dengan lima tahapan pembelajaran inkuiri (Model 5E) untuk mengembangkan system thinking dan generic science skills mahasiswa.

Buku ini adalah hasil dari penelitian disertasi yang telah divalidasi secara empiris dan menunjukkan efektivitas tinggi dalam meningkatkan kemampuan berpikir sistem dan keterampilan sains generik mahasiswa farmasi. Setiap bab dirancang untuk memberikan pengalaman pembelajaran yang autentik dan relevan dengan praktik farmasi profesional.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	6
BAB 1 FRAMEWORK SOCIO-TECHNICAL INQUIRY LEARNING (STIL).....	11
A. Pendahuluan Framework STIL.....	12
BAB 2 KOMPONEN FRAMEWORK STIL	16
A. Goals (Tujuan Pembelajaran).....	17
B. People (Manusia)	21
C. Technology (Teknologi).....	22
D. Infrastructure (Infrastruktur)	24
E. Culture (Budaya).....	25
F. Process (Proses)	26
BAB 3 Keunggulan dan Inovasi Framework STIL	29
A. Konteks Pembelajaran Autentik yang Terintegrasi.....	30
B. Perspektif Sosio-Teknis Holistik yang Komprehensif.....	30
C. Pembelajaran Kolaboratif yang Mensimulasikan Praktik Profesional	30
D. Penilaian Komprehensif yang Multi-Dimensi.....	31
E. Fleksibilitas Adaptasi untuk Berbagai Konteks.....	31
BAB 4 Implementasi Framework STIL	32
A. Persiapan Implementasi	33
B. Tahapan Implementasi	34
C. Dukungan Implementasi.....	35

D. Tantangan dan Solusi dalam Implementasi STIL	36
E. Strategi untuk Keberlanjutan.....	38
F. Dampak dan Kontribusi Framework STIL.....	39
BAB 5 SPEKTROFOTOMETER UV-VIS	43
A. PRINSIP FISIKA SPEKTROFOTOMETRI UV-VIS.....	44
B. KOMPONEN SPEKTROFOTOMETER & PRINSIP FISIKANYA ..	49
C. Pembelajaran dengan Framework STIL	55
BAB 6 VISKOMETER BROOKFIELD	62
A. PRINSIP FISIKA DASAR VISKOSITAS	63
B. RHEOLOGI: FLUIDA NEWTONIAN VS NON-NEWTONIAN	66
C. VISKOMETER BROOKFIELD: PRINSIP DAN KOMPONEN.....	71
D. PROSEDUR PENGUKURAN STANDAR.....	75
E. APLIKASI DALAM FARMASI.....	77
F. TROUBLESHOOTING COMMON PROBLEMS.....	80
G. KALIBRASI DAN VERIFIKASI	82
H. ADVANCED RHEOMETRY (Beyond Brookfield)	83
I. REGULATORY DAN COMPLIANCE	84
J. EMERGING TECHNOLOGIES	85
BAB 7 MESIN CETAK TABLET	87
A. PRINSIP FISIKA DASAR KOMPRESI TABLET	93
B. KOMPONEN MESIN CETAK TABLET	93
C. SIKLUS KOMPRESI TABLET: 4 TAHAP DETAIL	97
D. PARAMETER PROSES DAN KUALITAS TABLET	101
E. DEFEK TABLET: TROUBLESHOOTING GUIDE	104

F. STUDI KASUS INDUSTRI: SCALE-UP TABLET METFORMIN HCl 500 mg.....	106
G. EMERGING TECHNOLOGIES DAN FUTURE TRENDS.....	109
H. VALIDASI PROSES KOMPRESI (FDA/ICH Guidelines)	110
DAFTAR PUSTAKA.....	112

PEMBELAJARAN FARMASI FISIKA BERBASIS STIL

BAB 1 FRAMEWORK SOCIO- TECHNICAL INQUIRY LEARNING (STIL)



A. Pendahuluan Framework STIL

1. Latar Belakang

Pendidikan farmasi modern menghadapi tantangan kompleks dalam mempersiapkan mahasiswa untuk praktik profesional yang semakin terintegrasi dengan teknologi canggih dan memerlukan pemahaman mendalam tentang sistem sosio-teknis. Praktik farmasi kontemporer tidak lagi hanya mengandalkan pengetahuan teoritis, tetapi memerlukan kemampuan untuk bernavigasi dalam sistem yang melibatkan interaksi kompleks antara manusia, teknologi, regulasi, dan dampak sosial.

Framework Socio-Technical Inquiry Learning (STIL) dikembangkan sebagai respons terhadap gap antara pembelajaran farmasi tradisional yang cenderung teoritis dengan kebutuhan industri yang menuntut profesional farmasi mampu berpikir sistemik dan memiliki keterampilan sains generik yang adaptif. Penelitian awal menunjukkan bahwa mahasiswa farmasi sering mengalami kesulitan dalam mengintegrasikan pengetahuan fisika dasar dengan aplikasi praktis dalam teknologi farmasi, serta kurang memiliki kesadaran tentang dampak sosial dari keputusan teknis yang mereka buat.

2. Filosofi Pembelajaran STIL

STIL dibangun atas filosofi bahwa pembelajaran fisika farmasi harus terjadi dalam konteks yang autentik, di mana mahasiswa tidak hanya memahami prinsip-prinsip fisika sebagai entitas terpisah, tetapi sebagai bagian integral dari sistem sosio-teknis yang lebih luas. Pendekatan ini mengakui bahwa dalam praktik nyata, keputusan teknis selalu memiliki dimensi sosial, ekonomi, dan etis yang tidak dapat diabaikan.

Framework ini juga didasarkan pada pemahaman bahwa keterampilan berpikir sistem (system thinking) dan keterampilan sains generik (generic science skills) merupakan kompetensi inti yang memungkinkan profesional farmasi untuk beradaptasi dengan perubahan teknologi yang cepat dan menghadapi tantangan yang belum pernah ada sebelumnya. Dengan mengintegrasikan pembelajaran inkuiri dengan perspektif sosio-teknis, STIL mempersiapkan mahasiswa untuk

menjadi pemikir kritis yang mampu melihat gambaran besar sambil tetap mempertahankan ketelitian dalam detail teknis.

3. Definisi dan Karakteristik STIL

STIL didefinisikan sebagai kerangka kerja pembelajaran yang mengintegrasikan secara sistematis enam komponen sistem sosio-teknis (Goals, People, Technology, Infrastructure, Culture, Process) dengan lima tahapan pembelajaran inkuiri (5E Learning Cycle: Engagement, Exploration, Explanation, Elaboration, Evaluation) dalam konteks autentik praktik farmasi profesional.

Karakteristik utama STIL meliputi:

1. **Kontekstualitas:** Semua pembelajaran terjadi dalam konteks masalah nyata yang dihadapi industri farmasi
2. **Integrasi:** Pengetahuan fisika tidak dipelajari secara terpisah tetapi terintegrasi dengan aspek teknologi dan sosial
3. **Kolaborativitas:** Pembelajaran terjadi dalam dinamika tim yang mensimulasikan praktik profesional
4. **Reflektivitas:** Mahasiswa didorong untuk melakukan refleksi kritis terhadap proses dan hasil pembelajaran
5. **Adaptivitas:** Framework fleksibel untuk disesuaikan dengan berbagai konteks dan teknologi

4. Landasan Teoritis Framework STIL

a. Teori Sistem Sosio-Teknis Framework STIL

Framework STIL dibangun atas landasan teori sistem sosio-teknis yang dikembangkan oleh Tavistock Institute pada tahun 1950-an dan terus berkembang hingga saat ini. Teori ini mengakui bahwa organisasi dan sistem kerja modern terdiri dari dua subsistem yang saling terkait: subsistem teknis (teknologi, tugas, lingkungan fisik) dan subsistem sosial (manusia, struktur sosial, budaya).

Dalam konteks pendidikan farmasi, teori sosio-teknis memberikan framework untuk memahami bagaimana pembelajaran tidak dapat dipisahkan dari konteks sosial dan teknologi di mana pembelajaran tersebut terjadi. Mahasiswa

belajar tidak hanya dari konten akademik, tetapi juga dari interaksi dengan teknologi, dinamika kelompok, budaya laboratorium, dan ekspektasi profesional.

Penerapan teori sosio-teknis dalam STIL menghasilkan pemahaman bahwa efektivitas pembelajaran bergantung pada optimisasi simultan aspek teknis (kurikulum, metode, teknologi) dan aspek sosial (kolaborasi, komunikasi, budaya belajar). Hal ini berbeda dengan pendekatan tradisional yang cenderung fokus pada salah satu aspek saja.

b. Teori Pembelajaran Inkuiri

Komponen pembelajaran inkuiri dalam STIL didasarkan pada teori konstruktivisme sosial yang menekankan bahwa pengetahuan dibangun melalui interaksi aktif pembelajar dengan lingkungan dan dengan pembelajar lain. Model 5E (Engagement, Exploration, Explanation, Elaboration, Evaluation) yang diadopsi STIL telah terbukti efektif dalam mengembangkan pemahaman konseptual dan keterampilan proses sains.

Tahap Engagement dalam STIL dirancang untuk mengaktifkan prior knowledge mahasiswa dan menciptakan cognitive dissonance yang memotivasi inquiry. Tahap Exploration memberikan kesempatan untuk investigasi hands-on yang memungkinkan construction of knowledge melalui direct experience. Tahap Explanation memfasilitasi articulation dan clarification pemahaman yang telah dibangun. Tahap Elaboration mengaplikasikan pengetahuan dalam konteks baru, sedangkan tahap Evaluation melakukan assessment holistik terhadap pencapaian pembelajaran.

c. Teori System Thinking

System thinking sebagai salah satu tujuan utama STIL didasarkan pada teori kompleksitas yang mengakui bahwa fenomena dalam dunia nyata tidak dapat dipahami dengan pendekatan reduktionist semata. System thinking melibatkan kemampuan untuk melihat interkoneksi, mengidentifikasi pola, dan memahami struktur yang mendasari perilaku sistem.

Dalam konteks farmasi fisika, system thinking memungkinkan mahasiswa untuk memahami bahwa teknologi farmasi tidak beroperasi dalam isolation, tetapi

sebagai bagian dari sistem yang lebih luas yang mencakup regulasi, ekonomi, sosial, dan etika. Misalnya, keputusan tentang metode analisis spektrofotometri tidak hanya berdasarkan pertimbangan teknis semata, tetapi juga mempertimbangkan cost-effectiveness, environmental impact, dan patient safety.

d. Teori Generic Science Skills

Konsep generic science skills dalam STIL didasarkan pada pemahaman bahwa dalam era perubahan teknologi yang cepat, keterampilan spesifik dapat menjadi obsolete, tetapi keterampilan generik yang dapat ditransfer antar konteks menjadi semakin berharga. Keterampilan ini meliputi observasi, measurement, classification, inference, prediction, communication, dan lain-lain.

STIL mengembangkan generic science skills melalui interaksi langsung dengan teknologi farmasi yang autentik. Mahasiswa belajar tidak hanya cara mengoperasikan spektrofotometer, tetapi juga mengembangkan keterampilan observasi yang dapat diterapkan pada berbagai instrumen analitik. Mereka belajar tidak hanya cara menghitung viskositas, tetapi juga mengembangkan kemampuan modeling yang dapat digunakan untuk berbagai fenomena fisika.

PEMBELAJARAN FARMASI FISIKA BERBASIS STIL

BAB 2

KOMPONEN FRAMEWORK STIL



A. Goals (Tujuan Pembelajaran)

Komponen Goals dalam framework STIL mencakup empat dimensi utama yang saling terintegrasi dan dirancang untuk menghasilkan lulusan yang competent, adaptive, dan professional-ready.

1. Pengembangan System Thinking

System thinking dalam STIL meliputi empat kemampuan inti:

a. Kemampuan Menganalisis Struktur Sistem

Mahasiswa mengembangkan kemampuan untuk mengidentifikasi komponen-komponen dalam sistem farmasi dan memahami bagaimana komponen-komponen tersebut terorganisir dalam hirarki dan jejaring. Dalam spektrofotometri, misalnya, mahasiswa belajar mengidentifikasi tidak hanya komponen hardware (sumber cahaya, monokromator, detektor), tetapi juga komponen software, prosedur operasi, standar kualitas, dan konteks regulasi yang membentuk sistem analisis yang lengkap.

b. Kemampuan Mengidentifikasi Interaksi Antar Komponen

Fokus pada pemahaman bagaimana perubahan dalam satu komponen dapat mempengaruhi komponen lain dalam sistem. Mahasiswa belajar bahwa masalah dalam sumber cahaya spektrofotometer tidak hanya mempengaruhi intensitas, tetapi juga stabilitas, reproduktibilitas, dan pada akhirnya keputusan quality control yang berdampak pada keselamatan pasien.

c. Kemampuan Mengenali Pola Sistem

Pengembangan kemampuan untuk mengidentifikasi pola berulang dalam perilaku sistem dan memahami underlying structures yang menciptakan pola tersebut. Dalam viskometri, mahasiswa belajar mengenali pola hubungan antara struktur molekuler, kondisi lingkungan, dan sifat rheologi, serta bagaimana pola ini berulang pada berbagai jenis sediaan farmasi.

d. Kemampuan Memprediksi Perilaku Sistem

Kemampuan tertinggi dalam system thinking adalah prediksi perilaku sistem dalam berbagai skenario. Mahasiswa mengembangkan kemampuan untuk mengantisipasi bagaimana perubahan parameter proses dalam tableting akan

mempengaruhi kualitas produk akhir, dan bagaimana perubahan regulasi dapat mempengaruhi seluruh chain of pharmaceutical operations.

2. Peningkatan Generic Science Skills

Generic science skills dikembangkan melalui sembilan dimensi yang saling reinforcing:

a. Pengamatan Langsung

Pengembangan kemampuan observasi menggunakan indera dengan systematic approach. Mahasiswa belajar melakukan observasi terstruktur terhadap fenomena fisika dalam farmasi, seperti perubahan warna larutan dalam spektrofotometri, consistency flow dalam viskometri, atau appearance tablet dalam tableting. Observasi tidak hanya recording of facts, tetapi juga pattern recognition dan anomaly detection.

b. Pengamatan Tidak Langsung

Kemampuan menggunakan instrumen untuk mengobservasi fenomena yang tidak dapat diamati langsung. Mahasiswa mengembangkan understanding tentang bagaimana instrumen memperluas kemampuan observasi manusia, limitations of instrumental methods, dan cara menginterpretasikan data instrumental dalam konteks fenomena fisika yang underlying.

c. Kesadaran Skala

Pemahaman tentang bagaimana fenomena farmasi terjadi pada berbagai skala, dari molekuler hingga industrial, dan bagaimana properties pada satu skala dapat emerge pada skala yang lebih tinggi. Mahasiswa memahami bahwa interaksi molekuler dalam spektrofotometri bermanifestasi sebagai absorpsi pada skala makro, dan bagaimana sifat powder pada skala partikel mempengaruhi processability pada skala manufaktur.

d. Bahasa Simbolik

Kemampuan menggunakan dan menginterpretasi representasi simbolik, matematis, dan grafis. Mahasiswa mengembangkan fluency dalam mathematical expressions, chemical structures, process diagrams, dan statistical representations yang merupakan lingua franca dalam scientific communication.

e. Kerangka Logika

Kemampuan membangun argumentasi yang logis dan coherent berdasarkan evidence dan reasoning principles. Mahasiswa belajar cara mengkonstruksi logical arguments, mengidentifikasi fallacies, dan mengevaluasi strength of evidence dalam scientific contexts.

f. Inferensi Logis

Kemampuan menarik kesimpulan yang valid dari data dan observations. Mahasiswa mengembangkan skills dalam inductive dan deductive reasoning, understanding tentang uncertainty dan probability, dan kemampuan untuk distinguish antara correlation dan causation.

g. Hukum Sebab Akibat

Pemahaman mendalam tentang causal relationships dalam sistem farmasi. Mahasiswa belajar mengidentifikasi causal chains, memahami direct dan indirect effects, dan mengembangkan kemampuan untuk predict consequences of interventions.

h. Pemodelan Matematis

Kemampuan mengembangkan dan menggunakan mathematical models untuk represent dan predict pharmaceutical phenomena. Mahasiswa belajar cara memilih appropriate models, estimate parameters, validate model performance, dan understand model limitations.

i. Membangun Konsep

Kemampuan highest-order untuk mengintegrasikan experiences, observations, dan knowledge untuk construct new conceptual understanding. Mahasiswa mengembangkan kemampuan untuk synthesize information dari multiple sources, identify underlying principles, dan generate novel insights.

3. Penguasaan Konten Farmasi Fisika

Komponen ini memastikan bahwa mahasiswa menguasai content knowledge yang specific untuk farmasi fisika:

a. Prinsip Fisika dalam Spektrofotometri

Pemahaman mendalam tentang interaksi electromagnetic radiation dengan matter, quantum mechanical basis of absorption, molecular orbital theory, dan Beer's law. Mahasiswa tidak hanya memorize formulas, tetapi understand underlying physics dan dapat apply principles dalam various analytical contexts.

b. Rheologi dan Viskositas Sediaan Farmasi

Comprehensive understanding tentang fluid mechanics, molecular basis of viscosity, non-Newtonian behavior, dan relationship antara molecular structure dan flow properties. Mahasiswa memahami implications untuk formulation design, manufacturing processes, dan patient experience.

c. Mekanika Material dalam Teknologi Tablet

Deep understanding tentang mechanical properties of materials, compaction mechanisms, particle interactions, dan relationship antara process parameters dan product quality. Mahasiswa mampu apply principles untuk troubleshoot manufacturing problems dan optimize processes.

4. Kompetensi Laboratorium Terintegrasi

Komponen ini mengintegrasikan technical skills dengan professional competencies:

a. Keterampilan Operasional Instrumen

Proficiency dalam operating pharmaceutical instruments dengan emphasis pada understanding principles, proper procedures, safety protocols, dan quality standards. Mahasiswa mengembangkan not just button-pushing skills, tetapi intelligent operation berdasarkan understanding.

b. Analisis Data dan Interpretasi Hasil

Advanced skills dalam data analysis, statistical interpretation, quality assessment, dan decision making berdasarkan analytical results. Mahasiswa belajar cara handle uncertainty, assess data quality, dan communicate results effectively.

c. Troubleshooting dan Problem Solving

Systematic approach untuk identify, analyze, dan resolve technical problems. Mahasiswa mengembangkan diagnostic skills, root cause analysis capabilities, dan creative problem-solving approaches.

B. People (Manusia)

Komponen People dalam STIL mengakui bahwa pembelajaran adalah fundamentally social activity yang melibatkan complex interactions antara berbagai stakeholders:

1. Mahasiswa sebagai Pembelajar Aktif

Dalam STIL, mahasiswa berperan sebagai active constructors of knowledge rather than passive recipients. Mereka engaged dalam authentic inquiry, bertanggung jawab untuk own learning, dan berpartisipasi actively dalam learning community. Mahasiswa bekerja dalam collaborative teams yang mensimulasikan professional work environments, mengembangkan tidak hanya technical competencies tetapi juga interpersonal skills, communication abilities, dan leadership qualities.

Mahasiswa juga berperan sebagai peer educators, berbagi knowledge dan experiences dengan sesama, memberikan feedback constructive, dan supporting each other's learning. Hal ini mencerminkan reality dari professional practice dimana continuous learning dan knowledge sharing adalah essential untuk success.

2. Dosen sebagai Fasilitator Pembelajaran Inkuiri

Role dosen dalam STIL berbeda fundamental dari traditional teaching approaches. Dosen berfungsi sebagai facilitator yang guide inquiry process, provide scaffolding ketika diperlukan, tetapi tidak directly transfer knowledge. Mereka menciptakan learning environments yang conducive untuk exploration, encourage questioning dan critical thinking, dan help students construct their own understanding.

Dosen juga berperan sebagai model untuk professional behavior, demonstrating scientific integrity, ethical decision making, dan commitment

untuk lifelong learning. Mereka bring real-world experiences ke dalam classroom, connect academic learning dengan professional practice, dan help students understand broader implications dari technical decisions.

3. Asisten Laboratorium sebagai Sistem Pendukung Teknis

Asisten laboratorium dalam STIL tidak hanya provide technical support, tetapi juga serve sebagai bridge antara academic learning dan practical application. Mereka help students navigate technical challenges, provide guidance tentang proper procedures, dan ensure safe laboratory practices.

Asisten juga berperan dalam creating supportive learning environment, encouraging student experimentation, dan providing immediate feedback tentang technical performance. Mereka often serve sebagai near-peer mentors yang can relate to student experiences dan provide relevant advice.

4. Tim Pembelajaran yang Mencerminkan Dinamika Kerja Farmasi Profesional

STIL deliberately structures learning experiences untuk simulate professional team dynamics. Students work dalam multidisciplinary teams, mengambil different roles dan responsibilities, dan learn cara collaborate effectively untuk achieve common goals.

Team composition sering di-rotate untuk provide exposure untuk different working styles dan perspectives. Teams melakukan complete projects yang require integration dari multiple competencies, mirror complexity dari real-world pharmaceutical work, dan develop skills dalam project management, conflict resolution, dan consensus building.

C. Technology (Teknologi)

Komponen Technology dalam STIL melibatkan strategic integration dari pharmaceutical instrumentation yang serve not just sebagai tools untuk measurement, tetapi sebagai mediators untuk learning dan development dari higher-order thinking skills.

1. Spektrofotometer UV-Vis sebagai Gateway untuk Understanding Light-Matter Interactions

Spektrofotometer UV-Vis dipilih sebagai first technology exposure karena provides foundation untuk understanding electromagnetic spectrum, quantum mechanics applications, dan analytical chemistry principles. Instrument ini memungkinkan students untuk explore relationships antara molecular structure dan optical properties, understand concept dari quantitative analysis, dan develop skills dalam method validation.

Beyond technical aspects, spectrophotometry juga provides context untuk understanding quality control processes, regulatory requirements, dan implications untuk patient safety. Students learn bahwa analytical results are not just numbers, tetapi data yang inform critical decisions tentang drug quality dan safety.

2. Viskometer Brookfield sebagai Platform untuk Rheology Understanding

Viskometer Brookfield provides hands-on experience dengan fluid mechanics principles dan introduces students untuk complexity dari non-Newtonian behavior. Through rheological characterization, students understand relationships antara molecular structure, processing conditions, dan product performance.

Instrument ini juga provides excellent context untuk understanding patient-centric formulation design, manufacturing scale-up challenges, dan quality control dalam liquid dosage forms. Students learn cara balance technical requirements dengan patient acceptability dan manufacturing feasibility.

3. Mesin Cetak Tablet sebagai Introduction untuk Manufacturing Complexity

Tablet compression machine provides exposure untuk mechanical engineering principles, materials science, dan manufacturing processes. Students gain appreciation untuk complexity dalam transforming powders menjadi solid dosage forms dan understand critical importance dari process control dalam pharmaceutical manufacturing.

Technology ini juga provides context untuk understanding scale-up challenges, equipment design principles, dan integration dari process analytical technology dalam modern pharmaceutical manufacturing.

D. Infrastructure (Infrastruktur)

Komponen Infrastructure dalam STIL encompasses physical dan virtual environments yang support effective implementation dari socio-technical inquiry learning:

1. Ruang Laboratorium Fleksibel

Laboratory spaces di-design untuk accommodate different learning modalities, dari individual work hingga large group discussions. Furniture adalah modular dan easily reconfigurable untuk support different activities. Spaces include both wet laboratory areas untuk hands-on experimentation dan dry areas untuk data analysis, discussion, dan presentation.

Laboratory design juga incorporate safety considerations, environmental controls, dan storage solutions yang appropriate untuk pharmaceutical materials dan equipment. Spaces promote collaboration while also providing areas untuk focused individual work.

2. Area Diskusi dan Kolaborasi

Dedicated spaces untuk team meetings, group discussions, dan collaborative problem-solving activities. These areas equipped dengan presentation technology, whiteboards untuk brainstorming, dan comfortable seating arrangements yang promote productive interaction.

Collaboration spaces juga include virtual meeting capabilities untuk connect dengan industry professionals, participate dalam remote collaborations, dan access external expertise.

3. Akses ke Sumber Informasi Digital

Comprehensive digital infrastructure termasuk high-speed internet, access ke scientific databases, specialized software untuk data analysis dan modeling, dan learning management systems untuk course coordination.

Digital resources juga include virtual laboratory simulations, online reference materials, dan platforms untuk documentation dan sharing dari project results.

4. Fasilitas Pendukung Teknologi

Maintenance dan calibration facilities untuk ensure instrument reliability, storage systems untuk samples dan materials, dan specialized utilities (purified water, compressed air, etc.) yang required untuk pharmaceutical analysis.

Support facilities juga include areas untuk equipment training, demonstration spaces untuk large group instruction, dan workshop areas untuk hands-on equipment maintenance dan troubleshooting activities.

E. Culture (Budaya)

Komponen Culture dalam STIL deliberately fosters attitudes, values, dan behaviors yang essential untuk pharmaceutical professional practice:

1. Budaya Inquiry dan Skeptisisme Ilmiah

STIL promotes culture dimana questioning is valued, assumptions are challenged, dan evidence-based reasoning is the norm. Students learn cara ask meaningful questions, design appropriate investigations untuk answer those questions, dan evaluate evidence critically.

Healthy skepticism is encouraged - students learn cara distinguish antara legitimate scientific uncertainty dan unfounded doubt, understand limitations dari current knowledge, dan appreciate value dari replication dan peer review dalam scientific process.

2. Kolaborasi Ilmiah dan Etika Profesional

Culture dari STIL emphasizes collaboration rather than competition, knowledge sharing rather than hoarding, dan collective problem-solving rather than individual achievement semata. Students learn cara work effectively dalam teams, provide constructive feedback, dan support colleagues' learning dan development.

Professional ethics are woven throughout the curriculum, dengan emphasis pada integrity dalam data reporting, responsibility untuk patient safety, dan commitment untuk continuous improvement dalam professional practice.

3. Etos Evidence-Based Reasoning

Decisions dalam STIL environment always grounded dalam evidence dan logical reasoning. Students learn cara gather appropriate evidence, evaluate quality dan reliability dari different types of evidence, dan construct logical arguments based pada available data.

Culture juga promotes intellectual humility - willingness untuk change opinions when presented dengan better evidence, acknowledgment dari limitations dalam current understanding, dan openness untuk alternative perspectives.

4. Integritas dalam Pelaporan Hasil

Honest dan accurate reporting of results is fundamental expectation dalam STIL culture. Students learn importance dari documenting methodology carefully, reporting uncertainties dan limitations, dan distinguishing antara observations dan interpretations.

Culture juga emphasizes transparency dalam research process, reproducibility dari methods, dan accountability untuk accuracy dalam scientific communication.

F. Process (Proses)

Komponen Process dalam STIL operationalizes lima tahapan pembelajaran inkuiri yang telah diadaptasi untuk konteks socio-technical:

1. Engagement: Identifikasi Masalah Sosio-Teknis

Tahap Engagement dirancang untuk create cognitive dissonance dan motivate inquiry melalui presentation dari authentic problems yang faced oleh pharmaceutical industry. Students exposed pada real-world scenarios dimana technical decisions have social, economic, dan ethical implications.

Process ini melibatkan analysis dari case studies, interaction dengan industry professionals, dan examination dari current challenges dalam

pharmaceutical practice. Students learn cara identify stakeholders, understand different perspectives, dan appreciate complexity dari real-world problems.

2. Exploration: Investigasi Langsung Menggunakan Teknologi

Tahap Exploration provides hands-on opportunities untuk investigate pharmaceutical phenomena menggunakan authentic instrumentation. Students design dan conduct experiments, collect dan analyze data, dan explore relationships antara variables.

Process ini emphasizes learning through doing, dengan students taking ownership dari their investigations dan learning from both successes dan failures. Exploration activities are designed untuk build understanding gradually, dengan each activity building pada previous experiences.

3. Explanation: Konstruksi Penjelasan Ilmiah

Tahap Explanation focuses pada helping students articulate their understanding dan construct coherent explanations untuk phenomena mereka have observed. Students learn cara connect observations dengan underlying theory, use scientific vocabulary appropriately, dan communicate their understanding clearly.

Process ini involves peer discussion, presentation dari findings, dan feedback from instructors dan colleagues. Students learn cara defend their explanations dengan evidence dan reasoning, dan refine their understanding through interaction dengan others.

4. Elaboration: Aplikasi dalam Konteks Kompleks

Tahap Elaboration provides opportunities untuk apply newly constructed understanding dalam novel dan more complex contexts. Students take concepts mereka have learned dan apply them untuk solve new problems, explore different applications, atau investigate related phenomena.

Process ini is designed untuk deepen understanding dan promote transfer dari learning untuk new situations. Students work pada projects yang require integration dari multiple concepts dan consideration dari real-world constraints dan considerations.

5. Evaluation: Penilaian Holistik dan Refleksi

Tahap Evaluation involves both assessment dari student learning dan reflection pada learning process itself. Students engage dalam self-assessment, peer assessment, dan instructor assessment yang focuses pada both technical competencies dan development dari system thinking dan generic science skills.

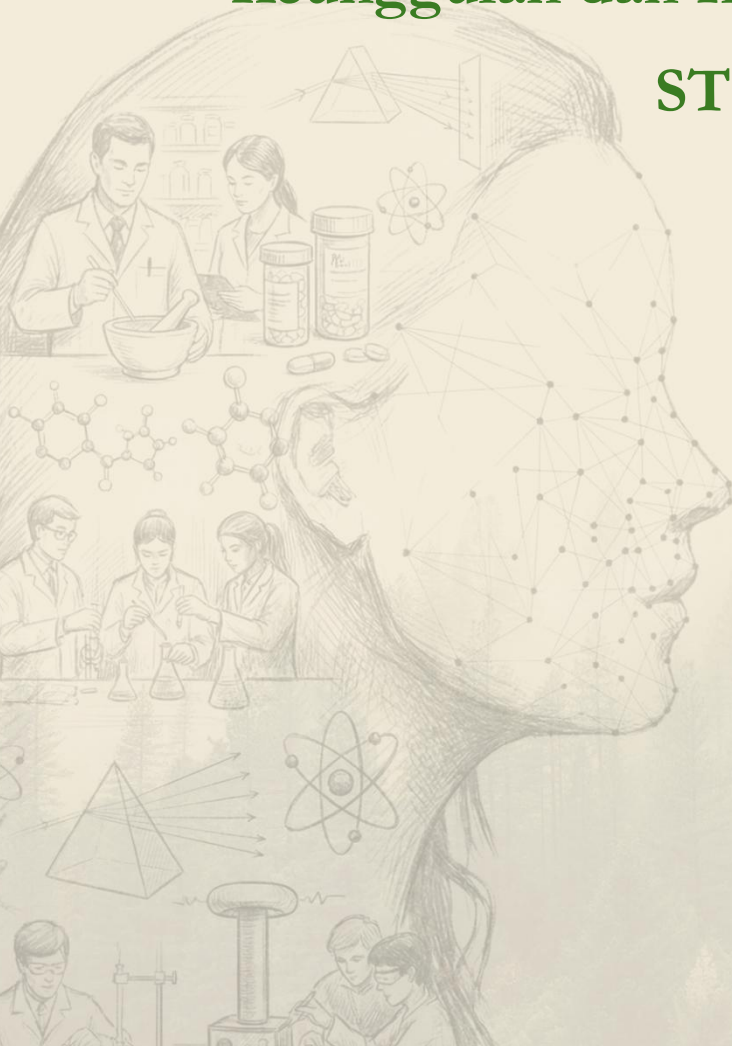
Process ini juga includes reflection pada learning experience, identification dari areas untuk further development, dan planning untuk continued learning dalam professional practice.

PEMBELAJARAN FARMASI FISIKA BERBASIS STIL

BAB 3

Keunggulan dan Inovasi Framework

STIL



A. Konteks Pembelajaran Autentik yang Terintegrasi

Keunggulan utama STIL terletak pada integration yang seamless antara academic learning dengan real-world pharmaceutical practice. Berbeda dengan pendekatan traditional yang often treat academic subjects sebagai separate entities, STIL embeds learning dalam authentic contexts dimana students can see immediate relevance dan application dari concepts mereka are learning.

Authenticity ini extends beyond simple case studies atau examples. Students work dengan actual pharmaceutical problems, use professional-grade instrumentation, dan engage dengan real data dan scenarios yang they would encounter dalam professional practice. This authentic context makes learning more meaningful, increases motivation, dan helps students develop deeper understanding dari material.

B. Perspektif Sosio-Teknis Holistik yang Komprehensif

STIL unique dalam its systematic integration dari technical, social, economic, dan ethical considerations dalam pharmaceutical education. Students learn bahwa technical decisions cannot be made dalam isolation, tetapi must consider broader implications untuk patients, society, dan industry.

Holistic perspective ini helps students develop critical thinking skills, ethical reasoning abilities, dan appreciation untuk complexity dalam pharmaceutical practice. They learn cara balance competing considerations, make decisions dalam uncertain situations, dan consider long-term implications dari their actions.

C. Pembelajaran Kolaboratif yang Mensimulasikan Praktik Profesional

Collaborative learning dalam STIL goes beyond simple group work. Students work dalam carefully structured teams yang mirror professional work

environments, complete dengan different roles, responsibilities, dan accountability measures.

Collaboration juga extends untuk interaction dengan industry professionals, participation dalam professional communities, dan engagement dengan broader pharmaceutical community. Students learn communication skills, teamwork abilities, dan professional behaviors yang essential untuk success dalam pharmaceutical careers.

D. Penilaian Komprehensif yang Multi-Dimensi

Assessment dalam STIL is designed untuk capture full range dari student development, dari technical competencies untuk professional attitudes dan values. Multiple assessment methods are used untuk provide comprehensive picture dari student learning dan development.

Assessment juga is integrated throughout learning process, providing continuous feedback untuk students dan opportunities untuk adjustment dan improvement. This formative approach untuk assessment supports learning rather than simply measuring it.

E. Fleksibilitas Adaptasi untuk Berbagai Konteks

STIL framework is designed untuk be adaptable untuk different educational contexts, different student populations, dan different technological resources. Core principles dan structure can be maintained while adapting specific implementation details untuk local conditions dan constraints.

Adaptability juga extends untuk keeping pace dengan technological developments, changing industry practices, dan evolving educational research. Framework can incorporate new technologies, new pedagogical approaches, dan new understanding tentang effective learning strategies.

PEMBELAJARAN FARMASI FISIKA BERBASIS STIL

BAB 4

Implementasi Framework STIL



A. Persiapan Implementasi

Implementasi yang berhasil dari kerangka kerja STIL memerlukan perencanaan dan persiapan yang teliti dalam beberapa dimensi. Implementasi STIL memerlukan perubahan signifikan dalam pola pikir fakultas dari penyampaian konten tradisional menuju fasilitasi pembelajaran berbasis inkuiri. Program pengembangan fakultas harus mencakup:

- **Orientasi terhadap filosofi dan prinsip STIL:** Pemahaman mendalam tentang teori sistem sosio-teknis, pendekatan pembelajaran berbasis inkuiri, dan strategi integrasi
- **Pelatihan teknik fasilitasi:** Keterampilan untuk membimbing inkuiri mahasiswa, mengajukan pertanyaan yang memancing pemikiran, memberikan bantuan yang tepat, dan mengelola dinamika kelompok
- **Pelatihan penilaian:** Pemahaman tentang pendekatan penilaian autentik, pengembangan rubrik, dan strategi umpan balik
- **Pelatihan teknologi:** Kemahiran menggunakan instrumentasi farmasi, perangkat lunak analisis data, dan alat kolaborasi digital

Pengembangan fakultas harus berkelanjutan bukan hanya pelatihan sekali waktu, dengan kesempatan reguler untuk refleksi, observasi sejawat, dan perbaikan berkelanjutan.

Implementasi STIL memerlukan restrukturisasi fundamental dari urutan mata kuliah tradisional. Pertimbangan utama meliputi:

- **Integrasi lintas mata kuliah:** STIL bekerja paling baik ketika diintegrasikan lintas beberapa mata kuliah daripada diimplementasikan secara terpisah
- **Urutan pengalaman:** Perencanaan cermat progresivitas dari aplikasi sederhana ke kompleks, dengan bantuan dan pengembangan keterampilan yang tepat

- **Alokasi waktu:** Pendekatan STIL biasanya memerlukan waktu lebih banyak daripada ceramah tradisional, memerlukan pertimbangan cermat cakupan konten versus kedalaman pembelajaran
- **Kebutuhan sumber daya:** Perencanaan kebutuhan peralatan, pemanfaatan ruang, dan personel pendukung

Dalam Pengembangan infrastruktur fisik dan teknologi harus mendukung pembelajaran inkuiri kolaboratif:

- **Ruang pembelajaran fleksibel:** Area yang dapat dengan mudah dikonfigurasi ulang untuk berbagai aktivitas, dengan integrasi teknologi yang tepat
- **Peralatan dan instrumentasi:** Peralatan analisis farmasi tingkat profesional dengan pemeliharaan dan dukungan yang tepat
- **Infrastruktur digital:** Sistem manajemen pembelajaran, perangkat lunak analisis data, platform kolaborasi, dan akses ke basis data profesional
- **Sistem keselamatan:** Protokol keselamatan, peralatan, dan pelatihan yang tepat untuk kerja laboratorium langsung

B. Tahapan Implementasi

1. Fase 1: Implementasi Percontohan (Semester 1-2)

Mulai dengan implementasi percontohan skala kecil dalam mata kuliah tunggal atau urutan mata kuliah. Fokus pada:

- Pelatihan tim fakultas inti
- Mengembangkan LKM (Lembar Kerja Mahasiswa) awal
- Menguji pendekatan penilaian
- Mengumpulkan umpan balik dari mahasiswa dan fakultas
- Memperbaiki implementasi berdasarkan pengalaman awal

2. Fase 2: Perluasan (Semester 3-4)

Perluas implementasi ke mata kuliah dan anggota fakultas tambahan:

- Melatih fakultas tambahan
- Mengembangkan perpustakaan LKM yang komprehensif
- Menerapkan sistem mentoring sejawat untuk fakultas

- Menetapkan protokol penilaian
- Memulai evaluasi sistematis hasil mahasiswa

3. Fase 3: Implementasi Penuh (Semester 5-6)

Implementasikan STIL di seluruh kurikulum:

- Menyelesaikan program pelatihan fakultas
- Menyelesaikan semua materi kurikulum
- Menetapkan proses jaminan kualitas
- Menerapkan sistem penilaian komprehensif
- Memulai pelacakan longitudinal hasil mahasiswa

4. Fase 4: Perbaikan Berkelanjutan (Berkelanjutan)

Menetapkan sistem untuk perbaikan dan adaptasi berkelanjutan:

- Aktivitas pengembangan fakultas reguler
- Evaluasi dan perbaikan sistematis materi
- Integrasi teknologi dan pendekatan baru
- Penyebaran pembelajaran kepada komunitas yang lebih luas

C. Dukungan Implementasi

1. Dukungan Administratif

Implementasi STIL yang berhasil memerlukan komitmen administratif yang kuat:

- **Alokasi sumber daya:** Pendanaan untuk peralatan, renovasi ruang, pengembangan fakultas, dan dukungan berkelanjutan
- **Keselaran kebijakan:** Kebijakan institusional yang mendukung pedagogi inovatif, penilaian autentik, dan pembelajaran kolaboratif
- **Sistem pengakuan:** Penghargaan dan pengakuan untuk keterlibatan fakultas dalam pendekatan pengajaran inovatif
- **Komitmen jangka panjang:** Pemahaman bahwa perubahan pedagogis signifikan memerlukan upaya berkelanjutan selama beberapa tahun

2. Persiapan Mahasiswa

Mahasiswa mungkin memerlukan persiapan untuk partisipasi yang berhasil dalam lingkungan STIL:

- **Orientasi pembelajaran berbasis inkuiri:** Pemahaman ekspektasi untuk partisipasi aktif, pembelajaran mandiri, dan kerja kolaboratif
- **Pengembangan keterampilan:** Keterampilan dasar dalam penulisan ilmiah, analisis data, presentasi, dan kerja tim
- **Persiapan pola pikir:** Pergeseran dari menerima informasi secara pasif ke konstruksi aktif pengetahuan

3. Kemitraan Industri

Kemitraan dengan industri farmasi meningkatkan keaslian dan relevansi pengalaman STIL:

- **Keahlian tamu:** Profesional industri sebagai pembicara tamu, penasihat proyek, dan mentor karir
- **Masalah dunia nyata:** Tantangan industri terkini sebagai dasar proyek mahasiswa
- **Kesempatan magang:** Jalur bagi mahasiswa untuk menerapkan pembelajaran dalam pengaturan profesional
- **Peralatan dan sumber daya:** Dukungan industri untuk instrumentasi, materi, dan keahlian

D. Tantangan dan Solusi dalam Implementasi STIL

1. Resistensi terhadap Perubahan

Implementasi pendekatan pedagogis inovatif sering menghadapi resistensi dari berbagai pemangku kepentingan. **Resistensi Fakultas:** Beberapa fakultas mungkin enggan meninggalkan metode pengajaran yang familiar, terutama jika mereka telah berhasil dengan pendekatan tradisional. Kekhawatiran termasuk peningkatan beban kerja, ketidakfamiliaran dengan teknik baru, dan ketidakpastian tentang efektivitas. **Solusi:** Berikan pengembangan fakultas yang komprehensif, ciptakan jaringan sejawat yang mendukung, tunjukkan bukti efektivitas, dan akui partisipasi dalam upaya inovasi. Mulai dengan pengadopsi awal yang bersedia dan bangun kisah sukses yang dapat meyakinkan rekan yang skeptis.

Resistensi Mahasiswa: Mahasiswa yang terbiasa dengan pembelajaran pasif mungkin awalnya menolak persyaratan partisipasi aktif. Mereka mungkin lebih suka format ceramah yang familiar dan merasa tidak nyaman dengan ketidakpastian yang melekat dalam pembelajaran berbasis inkuiri. **Solusi:** Berikan orientasi yang jelas tentang ekspektasi baru, berikan bantuan pengalaman awal untuk membangun kepercayaan diri, tunjukkan nilai pendekatan pembelajaran aktif, dan berikan dukungan berkelanjutan selama periode transisi.

Resistensi Administratif: Administrator mungkin khawatir tentang biaya, persyaratan sumber daya, dan risiko potensial dari menyimpang dari praktik yang mapan. **Solusi:** Sajikan bukti yang meyakinkan tentang efektivitas, kembangkan rencana implementasi yang jelas dengan timeline realistis, tunjukkan keselarasan dengan tujuan institusional, dan berikan pembaruan reguler tentang kemajuan dan hasil.

2. Kendala Sumber Daya

Implementasi STIL biasanya memerlukan sumber daya yang signifikan:

Biaya Peralatan: Instrumentasi farmasi tingkat profesional mahal untuk dibeli dan dipelihara. Beberapa set mungkin diperlukan untuk mengakomodasi ukuran kelas. **Solusi:** Jelajahi kemitraan dengan industri untuk berbagi atau donasi peralatan, cari pendanaan hibah untuk pembelian peralatan, pertimbangkan pengaturan sewa, dan prioritaskan peralatan berdasarkan dampak pembelajaran.

Kebutuhan Ruang: Ruang pembelajaran fleksibel yang mendukung kerja kolaboratif mungkin tidak tersedia di gedung kelas tradisional. **Solusi:** Penggunaan kreatif ruang yang ada, proyek renovasi untuk menciptakan lingkungan yang lebih fleksibel, kemitraan dengan departemen lain untuk berbagi ruang, dan pemanfaatan fasilitas di luar kampus bila tepat.

Kebutuhan Personel: STIL memerlukan keterlibatan fakultas yang lebih intensif dan mungkin memerlukan personel pendukung tambahan. **Solusi:** Perencanaan cermat beban fakultas, pelatihan mahasiswa pascasarjana atau sarjana lanjut sebagai tutor sejawat, dan penggunaan kreatif kemitraan industri untuk keahlian tambahan.

3. Tantangan Penilaian

Metode penilaian tradisional mungkin tidak sesuai untuk mengevaluasi kompetensi kompleks yang dikembangkan melalui STIL **Kompleksitas Penilaian:** Berpikir sistem dan keterampilan sains generik adalah konstruk multidimensi yang sulit dinilai menggunakan metode pengujian tradisional. **Solusi:** Kembangkan strategi penilaian komprehensif yang mencakup beberapa metode (penilaian kinerja, portofolio, penilaian sejawat, refleksi diri), investasikan dalam pelatihan fakultas untuk teknik penilaian, dan manfaatkan teknologi untuk mendukung pendekatan penilaian yang kompleks.

Persyaratan Waktu: Pendekatan penilaian autentik biasanya memerlukan lebih banyak waktu untuk administrasi dan penilaian. **Solusi:** Terapkan protokol penilaian yang efisien, manfaatkan penilaian sejawat untuk mengurangi beban fakultas, kembangkan rubrik yang jelas untuk penilaian yang konsisten, dan fokuskan penilaian pada hasil pembelajaran yang paling penting.

E. Strategi untuk Keberlanjutan

1. Integrasi Institusional

Untuk memastikan keberlanjutan jangka panjang, STIL harus diintegrasikan ke dalam struktur institusional daripada tetap bergantung pada juara individu:

- **Komite kurikulum:** Adopsi formal prinsip STIL dalam kebijakan kurikulum
- **Evaluasi fakultas:** Pengakuan pengajaran inovatif dalam proses promosi dan masa kerja
- **Perencanaan strategis:** Inklusi dalam rencana strategis institusional dan prioritas alokasi sumber daya
- **Jaminan kualitas:** Integrasi ke dalam proses akreditasi dan sistem peningkatan kualitas

2. Pembangunan Komunitas

Kembangkan komunitas praktik yang mendukung implementasi STIL berkelanjutan:

- **Komunitas pembelajaran fakultas:** Pertemuan reguler untuk berbagi pengalaman, memecahkan masalah, dan mengembangkan pendekatan baru
- **Komunitas mahasiswa:** Jaringan dukungan sejawat, program mentoring mahasiswa, dan kesempatan pengembangan kepemimpinan
- **Jaringan eksternal:** Koneksi dengan institusi lain yang menerapkan pendekatan serupa, organisasi profesional, dan mitra industri

3. Inovasi Berkelanjutan

Tetapkan proses untuk perbaikan dan adaptasi berkelanjutan:

- **Penelitian tindakan:** Investigasi sistematis tantangan dan solusi implementasi
- **Integrasi teknologi:** Evaluasi dan adopsi reguler teknologi baru yang dapat meningkatkan pengalaman STIL
- **Berbagi praktik terbaik:** Dokumentasi dan penyebaran pendekatan yang berhasil
- **Evaluasi eksternal:** Tinjauan berkala oleh ahli eksternal untuk mengidentifikasi peluang perbaikan

F. Dampak dan Kontribusi Framework STIL

1. Dampak pada Pendidikan Farmasi

Implementasi kerangka kerja STIL berpotensi memberikan dampak transformatif pada pendidikan farmasi:

a. Peningkatan Pembelajaran Mahasiswa

Pendekatan STIL menghasilkan pembelajaran yang lebih mendalam dan bermakna dibandingkan pendekatan tradisional. Mahasiswa mengembangkan bukan hanya pengetahuan konten tetapi juga keterampilan berpikir kompleks, kompetensi profesional, dan kesadaran akan tanggung jawab sosial. Pembelajaran lebih menarik, lebih relevan untuk praktik profesional, dan lebih mungkin dipertahankan dan diterapkan dalam konteks masa depan.

b. Peningkatan Kesiapan Lulusan

Mahasiswa yang dilatih melalui pendekatan STIL lebih siap untuk kompleksitas praktik farmasi modern. Mereka memiliki pengalaman dengan masalah autentik, lingkungan kerja kolaboratif, dan integrasi pertimbangan teknis, sosial, dan etis. Mereka lebih mudah beradaptasi, lebih mampu belajar sepanjang hayat, dan lebih efektif dalam pengaturan profesional.

c. Pengembangan Fakultas

Implementasi STIL mendorong pertumbuhan fakultas dalam pengetahuan dan keterampilan pedagogis. Fakultas mengembangkan pemahaman yang lebih mendalam tentang proses pembelajaran, menjadi fasilitator yang lebih efektif, dan sering melaporkan peningkatan kepuasan dengan pengajaran. Implementasi juga mendorong kolaborasi antara fakultas dan integrasi lintas batas disipliner.

d. Inovasi Institusional

STIL berfungsi sebagai katalis untuk inovasi institusional yang lebih luas dalam desain kurikulum, praktik penilaian, dan pengembangan lingkungan pembelajaran. Kesuksesan dengan STIL sering mengarah pada adopsi pendekatan serupa di area lain, menciptakan budaya inovasi pedagogis.

2. Kontribusi untuk Bidang Pendidikan

a. Integrasi Teori dan Praktik

STIL memberikan contoh konkret bagaimana teori dapat diintegrasikan dengan praktik secara bermakna. Kerangka kerja menunjukkan bagaimana teori sistem sosio-teknis, pendekatan pembelajaran berbasis inkuiri, dan strategi penilaian autentik dapat dikombinasikan untuk menciptakan pengalaman pembelajaran yang efektif.

b. Model Persiapan Profesional

STIL menawarkan model bagaimana program pendidikan profesional dapat lebih baik mempersiapkan mahasiswa untuk kompleksitas praktik profesional modern. Pendekatan ini tidak hanya berlaku untuk farmasi tetapi berpotensi untuk profesi kesehatan lainnya dan bidang teknis.

c. Inovasi Penilaian

Pendekatan penilaian yang dikembangkan untuk STIL berkontribusi pada pemahaman yang lebih luas tentang cara mengevaluasi kompetensi kompleks. Pekerjaan dalam menilai berpikir sistem dan keterampilan sains generik menyediakan metode yang dapat diterapkan dalam konteks pendidikan lainnya.

d. Integrasi Teknologi

STIL menunjukkan cara efektif untuk mengintegrasikan instrumentasi profesional dalam pengaturan pendidikan. Pendekatan menunjukkan bagaimana teknologi dapat berfungsi bukan hanya sebagai alat tetapi sebagai mediator untuk pembelajaran dan pengembangan keterampilan berpikir tingkat tinggi.

3. Implikasi untuk Penelitian Masa Depan

Kerangka kerja STIL membuka berbagai arah untuk penelitian masa depan dalam inovasi pendidikan:

a. Studi Perbandingan

Penelitian yang membandingkan STIL dengan pendekatan pedagogis inovatif lainnya dapat memberikan wawasan tentang efektivitas relatif dan strategi implementasi optimal. Studi dalam konteks yang berbeda dan dengan populasi yang berbeda akan membantu menetapkan generalisabilitas temuan.

b. Studi Longitudinal

Studi tindak lanjut jangka panjang yang melacak hasil profesional lulusan STIL akan memberikan bukti berharga tentang dampak jangka panjang pendekatan. Penelitian tentang lintasan karir, kinerja profesional, dan pembelajaran berkelanjutan akan memperkuat kasus untuk investasi dalam pedagogi inovatif.

c. Studi Penyempurnaan

Penelitian berkelanjutan untuk memperbaiki dan meningkatkan implementasi STIL akan berkontribusi pada pengembangan berkelanjutan pendekatan. Studi tentang strategi pengembangan fakultas optimal, pendekatan penilaian paling efektif, dan praktik terbaik untuk konteks yang berbeda akan mendukung adopsi yang lebih luas.

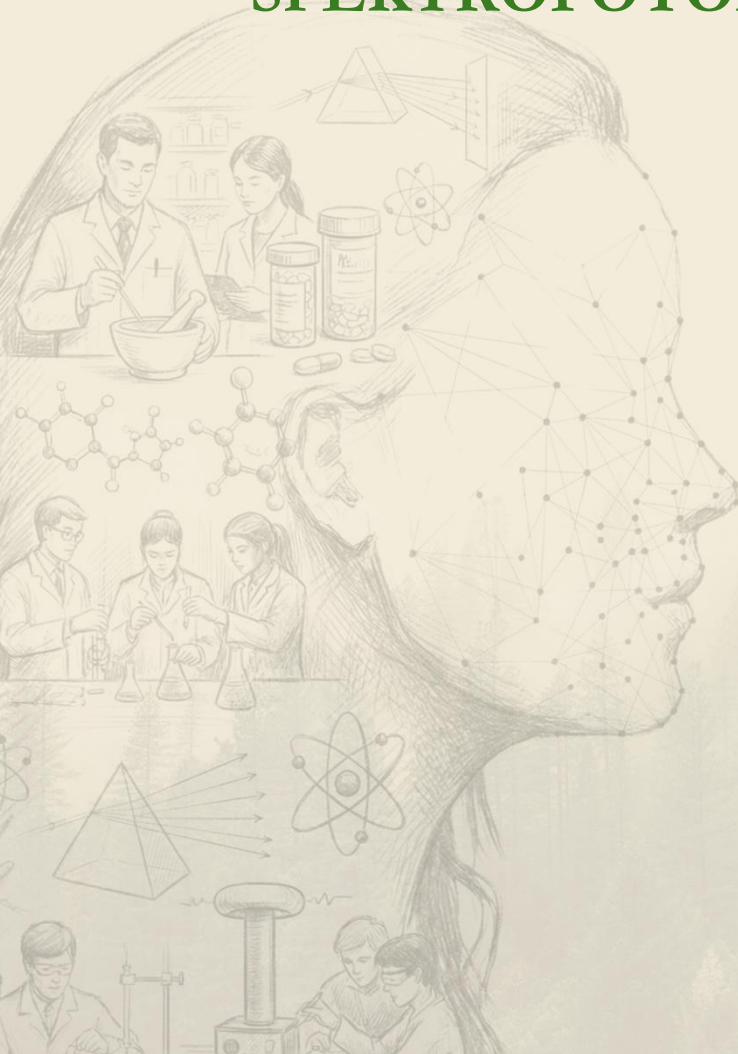
d. Penelitian Integrasi Teknologi

Seiring tersedianya teknologi baru, penelitian tentang integrasi dengan kerangka kerja STIL dapat mengarah pada pengalaman pembelajaran yang ditingkatkan. Studi tentang realitas virtual, kecerdasan buatan, dan teknologi emerging lainnya dalam konteks STIL dapat memelopori pendekatan baru untuk pendidikan farmasi.

PEMBELAJARAN FARMASI FISIKA BERBASIS STIL

BAB 5

SPEKTROFOTOMETER UV-VIS



A. PRINSIP FISIKA SPEKTROFOTOMETRI UV-VIS

1. Sifat Cahaya sebagai Gelombang Elektromagnetik

Spektroskopi UV-Vis memanfaatkan interaksi antara radiasi elektromagnetik dengan materi pada rentang panjang gelombang ultraviolet (190-400 nm) dan visible (400-800 nm). Cahaya dalam konteks ini dipandang memiliki sifat ganda - sebagai gelombang dan partikel (dualitas gelombang-partikel).

Persamaan Energi Foton:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Di mana:

E = energi foton (J)

h = konstanta Planck (6.626×10^{-34} J·s)

ν (nu) = frekuensi (Hz atau s^{-1})

c = kecepatan cahaya dalam vakum (2.998×10^8 m/s)

λ (lambda) = panjang gelombang (m)

Hubungan ini menunjukkan bahwa energi foton berbanding terbalik dengan panjang gelombang. Semakin pendek panjang gelombang, semakin tinggi energi fotonnya. Ini menjelaskan mengapa radiasi UV memiliki energi yang lebih tinggi dibandingkan cahaya tampak, dan karenanya mampu menginduksi transisi elektronik yang memerlukan energi lebih besar.

Spektrum Elektromagnetik dalam Konteks UV-Vis:

- **Far UV:** < 200 nm (energi sangat tinggi, dapat merusak DNA)
- **Near UV:** 200-400 nm (digunakan dalam spektroskopi analitik)
- **Visible:** 400-800 nm (cahaya yang dapat dilihat mata manusia)
- **Near IR:** > 800 nm (energi lebih rendah)

Dalam aplikasi farmasi, rentang 200-800 nm adalah yang paling sering digunakan karena sebagian besar senyawa farmasi memiliki gugus kromofor yang menyerap pada rentang ini (Singhal et al., 2024).

2. Interaksi Cahaya dengan Materi

Ketika cahaya melewati sampel, tiga fenomena dapat terjadi:

a. Absorpsi (Penyerapan)

Absorpsi terjadi ketika energi foton sesuai dengan perbedaan energi antara tingkat elektronik ground state dan excited state molekul. Elektron menyerap energi dan berpindah ke orbital yang lebih tinggi. Proses ini bersifat kuantisasi - hanya foton dengan energi spesifik yang dapat diserap.

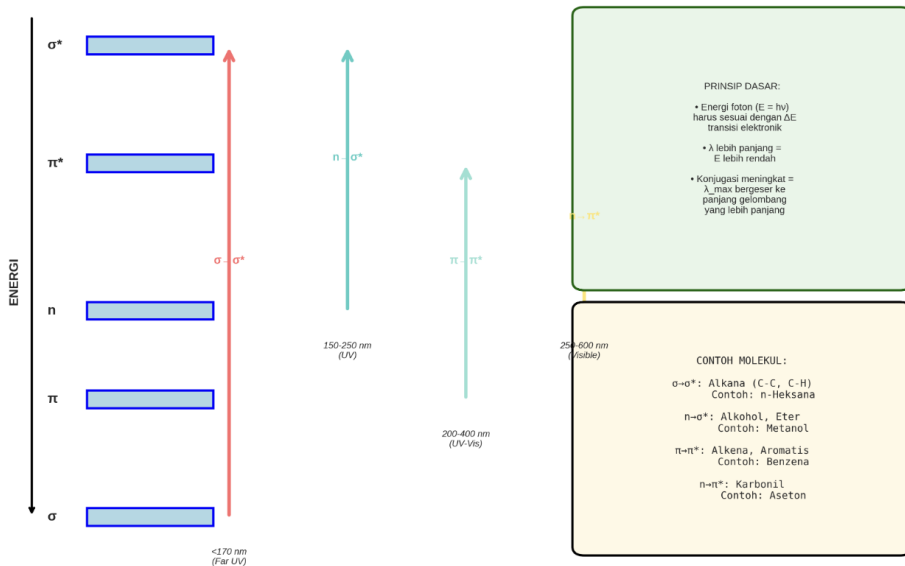
b. Transmisi (Pelewatan)

Cahaya yang tidak diserap akan diteruskan melewati sampel. Intensitas cahaya yang diteruskan (I) dibandingkan dengan intensitas cahaya awal (I_0) memberikan informasi tentang konsentrasi analit.

c. Refleksi dan Hamburan (Scattering)

Sebagian kecil cahaya dapat dipantulkan dari permukaan sampel atau mengalami hamburan oleh partikel dalam larutan. Fenomena ini dapat menjadi sumber error dan harus diminimalkan dalam pengukuran. Lihat Gambar 1 untuk visualisasi lengkap transisi elektronik.

TRANSISI ELEKTRONIK DALAM SPEKTROSKOPI UV-VIS



Gambar 1. Transisi electron pada Spektrofotometri Uv-Vis.

Terdapat empat jenis transisi elektronik utama:

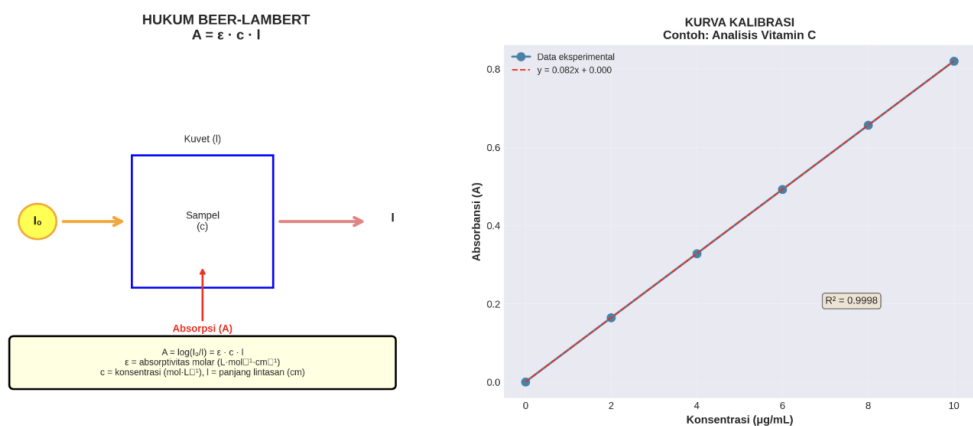
- $\sigma \rightarrow \sigma^*$ (sigma ke sigma-star)
 - Transisi dengan energi tertinggi ($\lambda < 170 \text{ nm}$)
 - Terjadi pada ikatan jenuh (C-C, C-H)
 - Jarang digunakan dalam analisis rutin karena memerlukan far-UV
 - Contoh: alkana seperti n-heksana
- $n \rightarrow \sigma^*$ (non-bonding ke sigma-star)
 - Energi sedang ($\lambda = 150\text{-}250 \text{ nm}$)
 - Terjadi pada molekul dengan pasangan elektron bebas (O, N, S, halogen)
 - Contoh: metanol ($\lambda_{max} \approx 184 \text{ nm}$), air ($\lambda_{max} \approx 167 \text{ nm}$)
- $\pi \rightarrow \pi^*$ (pi ke pi-star)
 - Transisi paling umum dalam analisis farmasi ($\lambda = 200\text{-}400 \text{ nm}$)
 - Terjadi pada molekul dengan ikatan rangkap terkonjugasi
 - Intensitas absorpsi tinggi (ϵ besar)

- Contoh: benzena ($\lambda_{\text{max}} \approx 254 \text{ nm}$), naftalena ($\lambda_{\text{max}} \approx 275 \text{ nm}$)
 - Semakin panjang sistem konjugasi, semakin bergeser λ_{max} ke panjang gelombang lebih panjang (bathochromic shift)
4. $n \rightarrow \pi^*$ (non-bonding ke pi-star)
- Energi paling rendah ($\lambda = 250\text{-}600 \text{ nm}$)
 - Terjadi pada molekul dengan gugus karbonil, nitro, azo
 - Intensitas absorpsi lebih lemah dibanding $\pi \rightarrow \pi^*$
 - Contoh: aseton ($\lambda_{\text{max}} \approx 279 \text{ nm}$), benzofenon ($\lambda_{\text{max}} \approx 350 \text{ nm}$)

Aturan Seleksi: Transisi elektronik tidak semua terjadi dengan probabilitas yang sama. Aturan seleksi kuantum menentukan transisi mana yang "diperbolehkan" (allowed) dan "terlarang" (forbidden). Transisi yang diperbolehkan memiliki koefisien absorpsi molar (ϵ) yang tinggi ($10^3\text{-}10^5 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$), sedangkan transisi terlarang memiliki ϵ yang rendah ($< 10^2 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$).

3. Hukum Beer-Lambert

Lihat Gambar 2 untuk visualisasi lengkap konsep Beer-Lambert Law dan kurva kalibrasi.



Gambar 2. Visualisasi lengkap konsep Beer-Lambert Law dan kurva kalibrasi.

Hukum Beer-Lambert adalah fondasi kuantitatif spektroskopi absorpsi. Hukum ini menyatakan bahwa absorbansi suatu larutan berbanding lurus dengan konsentrasi larutan dan panjang lintasan cahaya.

Persamaan Dasar:

$$A = \log \left(\frac{I_0}{I} \right) = \varepsilon \cdot c \cdot l$$

Di mana:

A = absorbansi (tanpa satuan)

I_0 = intensitas cahaya yang masuk ke sampel

I = intensitas cahaya yang keluar dari sampel

ε (epsilon) = absorptivitas molar atau koefisien ekstingsi molar
($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)

c = konsentrasi analit ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ atau M)

l = panjang lintasan optik/tebal kuvet (cm)

Hubungan dengan Transmittansi:

$$T = \frac{I}{I_0}$$

$$\%T = T \times 100\%$$

$$A = -\log T = 2 - \log (\%T)$$

Asumsi Hukum Beer-Lambert:

1. Cahaya Monokromatik: Sumber cahaya harus monokromatik. Dalam praktik, digunakan bandwidth sempit ($< 2 \text{ nm}$) untuk pendekatan monokromatisitas.
2. Larutan Homogen: Larutan harus homogen tanpa hamburan (scattering). Partikel suspensi atau koloid dapat menyebabkan deviasi.
3. Konsentrasi Rendah: Pada konsentrasi tinggi ($> 0.01 \text{ M}$), interaksi antar molekul analit dapat mengubah sifat absorpsi.

4. Tidak Terjadi Reaksi Kimia: Analit tidak boleh bereaksi atau berdisosiasi dalam pelarut. pH, suhu, dan ionic strength harus dikontrol.
5. Tidak Ada Fluoresensi atau Fosforesensi: Emisi cahaya oleh sampel dapat mengganggu pengukuran absorpsi.

Deviasi dari Hukum Beer-Lambert:

a. Deviasi Kimia:

- Disosiasi, asosiasi, atau solvolisis analit
- Reaksi dengan pelarut atau impuritas
- Perubahan pH yang mempengaruhi kesetimbangan kimia
- Contoh: indikator asam-basa yang berubah bentuk pada pH berbeda

b. Deviasi Instrumen:

- Radiasi stray light (cahaya tersasar)
- Bandwidth spektral terlalu lebar
- Non-linearitas detektor pada absorbansi tinggi
- Refleksi dan refraksi pada antarmuka kuvet

c. Deviasi Konsentrasi:

- Pada konsentrasi tinggi (> 0.01 M), jarak antar molekul berkurang
- Interaksi elektrostatik antar molekul meningkat
- Indeks bias berubah signifikan
- Aktivitas (activity) tidak sama dengan konsentrasi

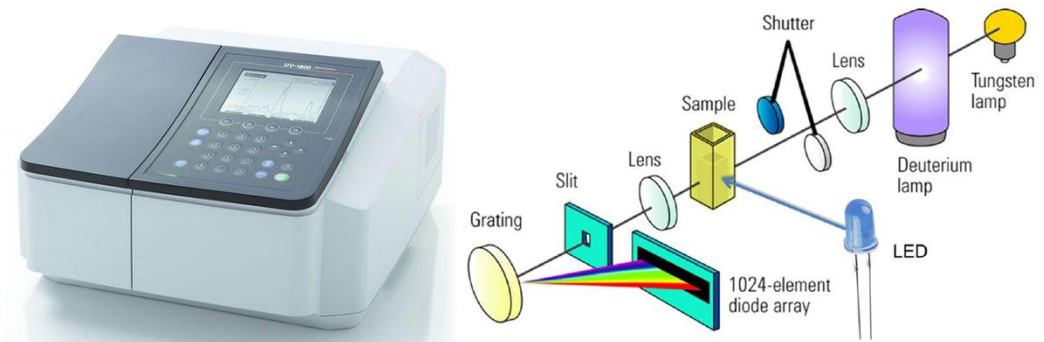
d. Rentang Absorbansi yang Optimal:

- $A < 0.1$: Error tinggi karena $\Delta I/I$ kecil
- $A = 0.2 - 0.8$: Rentang optimal dengan error minimal
- $A > 1.0$: Error meningkat karena I/I_0 sangat kecil
- $A > 2.0$: Sebagian besar instrumen tidak reliable

Untuk analisis kuantitatif yang akurat, sampel harus diencerkan atau dikonsentrasikan sehingga absorbansi berada dalam rentang 0.2-0.8.

B. KOMPONEN SPEKTROFOTOMETER & PRINSIP FISIKANYA

Spektrofotometer UV-Vis modern terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara sinergis untuk menghasilkan pengukuran yang akurat dan reproducible lihat gambar 3.



Gambar 3. Spektrofotometri Uv-Vis dan bagiannya

1. Sumber Cahaya (Light Source)

a. Lampu Deuterium (D₂) untuk UV

- Rentang: 190-400 nm
- Prinsip kerja: eksitasi listrik gas deuterium pada tekanan rendah
- Reaksi: $D_2 + \text{energi} \rightarrow 2D + h\nu$ (UV)
- Intensitas tinggi dan spektrum kontinyu
- Lifetime: 1000-2000 jam operasi
- Harus diganti secara berkala untuk menjaga intensitas

b. Lampu Tungsten-Halogen untuk Visible

- Rentang: 320-2500 nm (visible + near-IR)
- Prinsip kerja: pemanasan filamen tungsten hingga ~ 3000 K
- Siklus halogen mencegah penghitaman bulb
- Intensitas tinggi dan stabil
- Lifetime: 2000+ jam
- Efisien untuk rentang visible

c. Lampu Xenon (opsional)

- Rentang luas: 190-3200 nm
- Single source untuk UV dan visible
- Intensitas sangat tinggi tapi biaya mahal
- Kurang stabil dibanding kombinasi D₂ + tungsten
- Digunakan pada instrumen high-end

Switching Lamp: Pada dual-lamp system, switching antara lampu UV dan visible terjadi sekitar $\lambda = 340$ nm. Switching harus smooth untuk menghindari diskontinuitas spektra.

2. 2. Monokromator

Monokromator berfungsi mengisolasi panjang gelombang spesifik dari spektrum kontinyu sumber cahaya.

Komponen Monokromator:

- Entrance slit: mengontrol jumlah cahaya masuk
- Collimating mirror: mengubah cahaya divergen menjadi paralel
- Dispersing element: prisma atau grating
- Focusing mirror: memfokuskan cahaya terdispersi
- Exit slit: menentukan bandwidth spektral
 - a. Prisma (jarang digunakan modern instrument)
 - Prinsip: dispersi berdasarkan perbedaan indeks bias
 - Dispersi non-linear (λ pendek lebih tersebar)
 - Resolusi: sedang
 - Throughput: tinggi
 - Ukuran: besar
 - b. Diffraction Grating (paling umum)
 - Prinsip: interferensi konstruktif dan destruktif
 - Dispersi linear
 - Resolusi: tinggi (dapat mencapai 0.1 nm)
 - Dua tipe:
 - Ruled grating (mechanical)
 - Holographic grating (optically generated)

Persamaan Grating:

$$n\lambda = d(\sin \theta_i + \sin \theta_r)$$

Di mana:

- n = orde difraksi (biasanya $n = 1$ untuk UV-Vis)
- λ = panjang gelombang
- d = jarak antar garis grating (groove spacing)
- θ_i = sudut insiden
- θ_r = sudut difraksi

Bandwidth Spektral (SBW): SBW adalah lebar pita panjang gelombang yang keluar dari exit slit. SBW yang kecil (< 2 nm) penting untuk:

- Resolusi spektra yang baik
- Kepatuhan terhadap asumsi monokromatisitas Beer-Lambert
- Deteksi peak absorpsi yang tajam

Trade-off: SBW kecil = intensitas cahaya rendah = signal-to-noise ratio (SNR) rendah.

3. 3. Kuvet (Sample Cell/Cuvette)

Material Kuvet berdasarkan Rentang Panjang Gelombang:

a. Kuvet Quartz/Fused Silica

- Rentang: 190-2500 nm (UV + Visible + near-IR)
- Transmittansi tinggi di UV
- Mahal tapi durable
- Wajib untuk pengukuran < 350 nm
- Resistensi kimia excellent
- Harus dibersihkan dengan hati-hati (jangan gores)

b. Kuvet Kaca (Glass)

- Rentang: 350-2500 nm (Visible + near-IR saja)
- Tidak cocok untuk UV karena gelas menyerap UV

- Murah dan mudah didapat
- Cukup untuk analisis visible
- Rentan terhadap asam dan basa kuat
- c. Kuvet Plastik (Disposable)
- Rentang: 380-780 nm (Visible saja)
- Murah, sekali pakai
- Praktis untuk screening/quality control
- Akurasi lebih rendah
- Tidak untuk analisis presisi tinggi
- Tidak tahan pelarut organik

Panjang Lintasan Optik (Path Length):

- Standard: 1.0 cm (10 mm)
- Short path: 0.1, 0.2, 0.5 cm (untuk sampel dengan absorbansi tinggi)
- Long path: 5, 10 cm (untuk sampel dengan absorbansi rendah)

Volume Sampel:

- Kuvet standard (1 cm path): 3-4 mL
- Micro-cuvette (1 cm path): 50-500 μ L
- Ultra-micro (sub- μ L): 1-10 μ L (dengan teknologi khusus)

Perawatan Kuvet:

- Bersihkan dengan pelarut yang sesuai segera setelah digunakan
- Hindari goresan pada jendela optik
- Jangan sentuh jendela optik dengan jari (gunakan tissue optik)
- Matching kuvet set: kuvet yang matched memiliki path length identik (\pm 0.001 cm)

4. 4. Detektor

Detektor mengubah sinyal optik menjadi sinyal elektrik yang dapat diukur.

a. Photomultiplier Tube (PMT)

- Prinsip: efek fotoelektrik dan amplifikasi electron cascade
- Sensitivitas: sangat tinggi (dapat mendeteksi foton tunggal)
- Rentang: 190-900 nm

- Response time: sangat cepat (ns)
- Kelemahan: rentan terhadap cahaya intense (dapat rusak)
- Digunakan pada: single-wavelength instrument, scanning spectrophotometer

Cara Kerja PMT:

1. Foton mengenai photocathode → emisi elektron (fotoelektrik)
2. Elektron dipercepat menuju dynode pertama
3. Setiap elektron menghasilkan 3-5 elektron sekunder
4. Proses berulang melalui 8-12 dynode
5. Amplifikasi total: 10^6 - 10^7 kali
6. Elektron dikumpulkan di anode

b. Photodiode (PD)

- Prinsip: semikonduktor p-n junction
- Sensitivitas: sedang
- Rentang: 190-1100 nm
- Response time: cepat (μ s)
- Keunggulan: murah, compact, robust
- Digunakan pada: handheld instrument, field equipment

c. Photodiode Array (PDA)

- Array dari 256-2048 photodiode
- Dapat mengukur seluruh spektrum simultan (tidak perlu scanning)
- Response time: sangat cepat (ms untuk full spectrum)
- Keunggulan: rapid spectrum acquisition, ideal untuk HPLC detector
- Kelemahan: sensitivitas lebih rendah dari PMT
- Resolusi: ditentukan oleh jumlah diode dan dispersi

d. Charge-Coupled Device (CCD)

- Array 2D dari photokapasitor
- Sensitivitas tinggi
- Quantum efficiency: hingga 90%
- Digunakan pada: advanced research instrument

- Memerlukan cooling untuk mengurangi dark current

Karakteristik Detektor:

- Sensitivity: kemampuan mendeteksi sinyal lemah
- Linearity: respons linear terhadap intensitas cahaya
- Dynamic range: rentang intensitas yang dapat diukur
- Response time: kecepatan deteksi
- Spectral response: efisiensi pada berbagai λ

C. C. Pembelajaran dengan Framework STIL

TAHAP 1: ENGAGEMENT - Menghadapi Masalah Nyata

Situasi: PT. Sehat Sejahtera mengalami masalah besar. Batch tablet paracetamol 500 mg ditolak BPOM karena hasil analisis spektrofotometer menunjukkan kadar hanya 420 mg per tablet. Standar yang diizinkan adalah 475-525 mg per tablet. Kerugian mencapai 2,8 miliar rupiah!

Pertanyaan untuk diselidiki:

1. Mengapa cahaya bisa mengukur berapa banyak paracetamol dalam tablet?

Jawaban yang diharapkan: Molekul paracetamol dapat menyerap cahaya UV karena memiliki elektron yang dapat tereksitasi. Semakin banyak molekul paracetamol, semakin banyak cahaya yang diserap.

2. Mengapa paracetamol menyerap cahaya pada 243 nm?

Jawaban yang diharapkan: Paracetamol memiliki cincin benzena dengan substituen yang menyebabkan transisi elektronik $\pi \rightarrow \pi^*$ terjadi pada 243 nm.

3. Apa yang bisa menyebabkan kesalahan pengukuran?

Jawaban yang diharapkan: Kalibrasi alat tidak tepat, kuvet kotor, suhu tidak stabil, atau ada zat pengganggu.

Kegiatan pembelajaran:

- Mahasiswa mengamati spektrum absorpsi paracetamol
- Membandingkan warna larutan dengan konsentrasi berbeda
- Berdiskusi tentang kemungkinan penyebab kesalahan analisis

TAHAP 2: EXPLORATION - Menyelidiki Langsung

A. Mempelajari Sifat Cahaya (30 menit)

Kegiatan 1: Menghitung Energi Cahaya Mahasiswa menghitung energi foton pada panjang gelombang berbeda:

- Cahaya UV-C (200 nm):
- $E = (6,626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8) / (200 \times 10^{-9}) = 9,94 \times 10^{-19} \text{ J}$
- Cahaya UV-B (280 nm): $E = 7,10 \times 10^{-19} \text{ J}$
- Cahaya UV-A (340 nm): $E = 5,84 \times 10^{-19} \text{ J}$

Kesimpulan: Semakin pendek panjang gelombang, semakin besar energinya. Itulah mengapa UV lebih efektif untuk analisis obat.

Kegiatan 2: Mengamati Dispersi Cahaya Menggunakan prisma untuk melihat:

- Pemisahan cahaya putih menjadi pelangi
- Konsep cahaya monokromatik vs polikromatik
- Cara kerja monokromator dalam spektrofotometer

B. Membuktikan Hukum Lambert-Beer (45 menit)

Persiapan:

- Larutan standar paracetamol: 10, 20, 30, 40, 50 $\mu\text{g/mL}$
- Pelarut: asam klorida 0,1 M
- Panjang gelombang: 243 nm
- Kuvet: tebal 1 cm

Langkah kerja:

1. **Siapkan blanko:** Ukur absorbansi pelarut murni (harus mendekati nol)
2. **Ukur standar:** Lima konsentrasi berbeda, catat absorbansinya
3. **Ukur sampel:** Larutan dengan konsentrasi tidak diketahui
4. **Buat grafik:** Plot absorbansi (sumbu Y) vs konsentrasi (sumbu X)

Data yang diharapkan:

Konsentrasi ($\mu\text{g/mL}$)	Absorbansi	Ratio A/C
10	0,185	0,0185
20	0,371	0,0186
30	0,556	0,0185
40	0,742	0,0186

50 | 0,928 | 0,0186

Yang harus dipahami mahasiswa:

- Hubungan linear antara konsentrasi dan absorbansi
- Slope garis = $\epsilon \times b$ (absorptivitas \times tebal kuvet)
- R^2 harus $> 0,999$ untuk validitas baik

C. Mempelajari Komponen Spektrofotometer (25 menit)

Kegiatan 1: Sumber Cahaya

- Lampu deuterium untuk UV (190-400 nm)
- Lampu tungsten untuk visible (400-800 nm)
- Mengapa perlu dua lampu berbeda?

Kegiatan 2: Monokromator

- Fungsi memisahkan cahaya putih menjadi satu panjang gelombang
- Menggunakan grating (kisi difraksi) atau prisma
- Trade-off antara intensitas dan kemurnian cahaya

Kegiatan 3: Detektor

- Photodiode yang mengubah cahaya menjadi sinyal listrik
- Amplifikasi sinyal untuk pembacaan yang akurat
- Pentingnya stabilitas detektor

TAHAP 3: EXPLANATION - Memahami "Mengapa"

A. Mekanisme Absorpsi pada Tingkat Molekul

Struktur paracetamol yang perlu dipahami:

- Cincin benzena memberikan sistem elektron π
- Gugus -OH (hidroksil) sebagai auxochrome yang memperpanjang konjugasi
- Gugus -NHCOCH₃ (amida) yang juga berkontribusi pada konjugasi

Proses absorpsi:

1. **Keadaan dasar:** Elektron π berada di orbital yang stabil
2. **Absorpsi:** Foton 243 nm diserap, elektron naik ke tingkat π^*
3. **Keadaan tereksitasi:** Elektron berada di orbital yang tidak stabil

4. **Relaksasi:** Elektron kembali ke keadaan dasar (melepas energi sebagai panas)

Faktor yang mempengaruhi panjang gelombang maksimum:

- **Konjugasi lebih panjang:** λ_{\max} bergeser ke panjang gelombang lebih panjang
- Substituen yang memberikan elektron: λ_{\max} bergeser ke merah
- Substituen yang menarik elektron: λ_{\max} bergeser ke biru

B. Validasi Hukum Lambert-Beer

Uji linearitas:

- Koefisien korelasi (R^2) harus $> 0,999$
- Jika R^2 rendah, periksa:
 - Kualitas larutan standar
 - Stabilitas instrumen
 - Ada tidaknya interferensi

Analisis intercept:

- Seharusnya mendekati nol
- Jika intercept tinggi, kemungkinan:
 - Blanko tidak murni
 - Ada hamburan cahaya
 - Kuvet kotor atau cacat

Perhitungan absorptivitas molar:

$$\epsilon = \text{slope} / b$$

Untuk paracetamol: $\epsilon \approx 9.600 \text{ L/mol.cm}$ pada 243 nm

Batas deteksi (LOD):

$$\text{LOD} = 3,3 \times (\text{standar deviasi blanko} / \text{slope})$$

C. Berpikir Sistem dalam Spektrofotometer

Komponen utama dan fungsinya:

1. Sumber cahaya \rightarrow Monokromator \rightarrow Sampel \rightarrow Detektor
2. **Sistem kontrol:** Mengatur intensitas, memantau stabilitas
3. **Sistem data:** Mengolah sinyal menjadi absorbansi

Interaksi antar komponen:

- Stabilitas sumber cahaya mempengaruhi reproducibility
- Resolusi monokromator menentukan selektivitas
- Sensitivitas detektor membatasi limit deteksi
- Noise elektronik mempengaruhi presisi

Identifikasi masalah sistemik:

- Drift baseline: masalah sumber cahaya atau detektor
- Noise tinggi: masalah elektronik atau lingkungan
- Linearitas buruk: masalah optikal atau kimia

TAHAP 4: ELABORATION - Menerapkan dalam Konteks Luas

Tugas Video: "Spektrofotometer dalam Jaminan Kualitas Obat"

Struktur video (12-15 menit):

Bagian 1: Masalah Nyata (3 menit)

- Presentasi kasus batch obat yang ditolak
- Dampak pada perusahaan dan pasien
- Pentingnya analisis yang akurat

Bagian 2: Penjelasan Ilmiah (5 menit)

- Demonstrasi langsung penggunaan spektrofotometer
- Penjelasan mengapa paracetamol menyerap pada 243 nm
- Interpretasi kurva kalibrasi dan hasil pengukuran

Bagian 3: Pemecahan Masalah (4 menit)

- Troubleshooting: apa yang harus diperiksa jika hasil tidak akurat
- Validasi metode: bagaimana memastikan metode dapat dipercaya
- Quality control: bagaimana mempertahankan kualitas analisis

Bagian 4: Dampak Profesional (3 menit)

- Peran analis dalam memastikan keselamatan pasien
- Aspek regulasi dan compliance
- Karir di bidang quality control

Kriteria penilaian:

- Ketepatan penjelasan konsep fisika (25%)

- Keterampilan mengoperasikan alat (25%)
- Kemampuan troubleshooting (25%)
- Komunikasi profesional (25%)

TAHAP 5: EVALUATION - Penilaian Menyeluruh

A. Pemahaman Konsep Fisika (25%)

Soal tingkat dasar:

1. Mengapa molekul organik bisa dianalisis dengan spektrofotometer UV-Vis?
2. Jelaskan hubungan antara struktur molekul dengan λ_{\max} !
3. Sebutkan faktor-faktor yang dapat menyebabkan penyimpangan dari hukum Lambert-Beer!

Soal tingkat lanjut:

1. Analisis mengapa paracetamol memiliki $\lambda_{\max} = 243$ nm berdasarkan struktur elektroniknya!
2. Jika absorbansi = 0,456 pada konsentrasi = 25 $\mu\text{g/mL}$ dengan kuvet 1 cm, hitunglah absorptivitas molar!
3. Rancang protokol troubleshooting ketika kurva kalibrasi menunjukkan $R^2 = 0,985$!

B. Keterampilan Praktis (25%)

Checklist kompetensi:

- Kalibrasi instrumen dengan benar
- Preparasi sampel sesuai prosedur
- Pengoperasian software dengan tepat
- Interpretasi spektrum secara akurat
- Troubleshooting masalah instrumental
- Dokumentasi sesuai standar laboratorium

C. Kemampuan Pemecahan Masalah (25%)

Skenario 1: Interferensi spektral "Sampel mengandung kafein ($\lambda_{\max} = 273$ nm) dan paracetamol ($\lambda_{\max} = 243$ nm). Bagaimana strategi analisis simultan?"

Skenario 2: Matrix effect "Tablet mengandung eksipien yang menyebabkan keruhan. Apa pendekatan analisis yang tepat?"

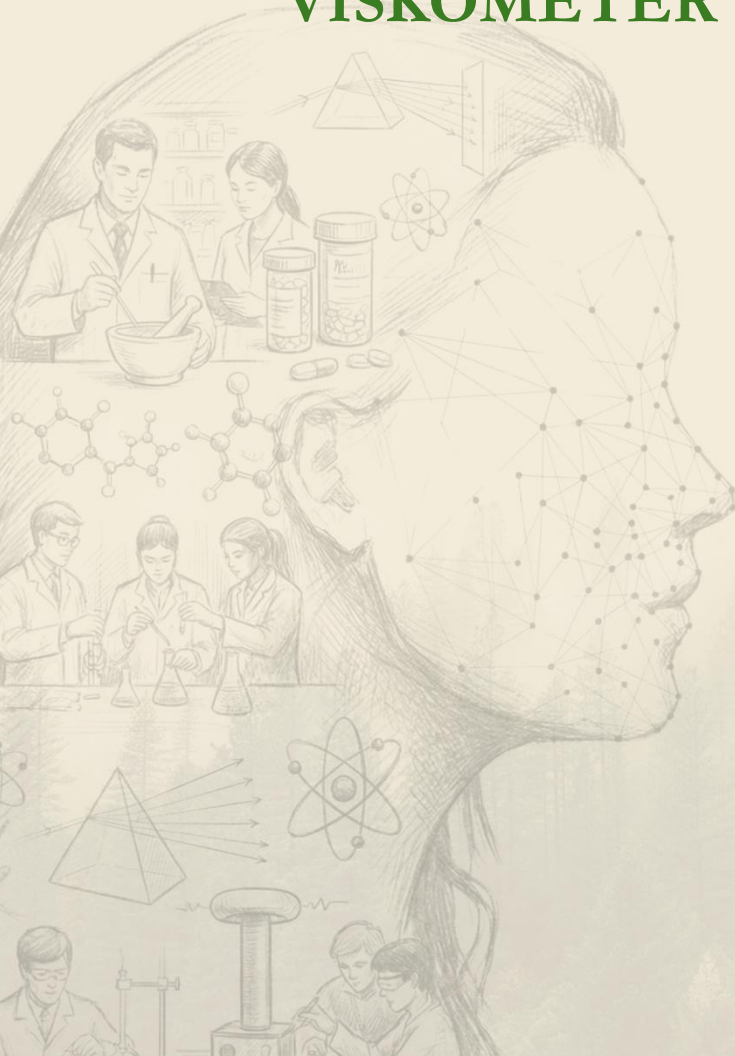
D. Kemampuan Berpikir Sistem (25%)

Level 1: Identifikasi komponen spektrofotometer **Level 2:** Memahami interaksi antar komponen **Level 3:** Optimisasi sistem untuk aplikasi spesifik **Level 4:** Prediksi perilaku sistem dalam berbagai kondisi

PEMBELAJARAN FARMASI FISIKA BERBASIS STIL

BAB 6

VISKOMETER BROOKFIELD



Viskositas adalah salah satu properti fisik paling fundamental dalam formulasi farmasi, khususnya untuk sediaan liquid dan semi-solid. Viskositas menentukan:

- Flowability: kemudahan liquid mengalir (penting untuk manufacturing dan filling)
- Spreadability: kemudahan aplikasi topical products
- Stability: resistance terhadap sedimentasi dalam suspensi
- Drug Release: rate pelepasan API dari matriks
- Patient Compliance: acceptability (ease of swallowing syrup, smoothness of cream)

Viskometer Brookfield adalah gold standard untuk measuring viscosity dalam industri farmasi karena kesederhanaan, reproducibility, dan compliance dengan pharmacopeial standards (USP <912>, Ph.Eur. 2.2.10).

Menurut data industri terkini, pasar global inline viscosity sensor mencapai USD 102.8 juta pada 2025 dan diproyeksikan tumbuh dengan CAGR 5.92% hingga 2033, driven by automation dan Industry 4.0 adoption (SNS Insider, 2025).

A. PRINSIP FISIKA DASAR VISKOSITAS

1. Definisi Viskositas

Viskositas (η , eta) adalah measure dari internal friction fluida - resistance terhadap flow atau deformasi. Secara intuitif:

- High viscosity: thick, flows slowly (e.g., honey, glycerin)
- Low viscosity: thin, flows easily (e.g., water, alcohol)

Analogi Makroskopik: Bayangkan dua pelat paralel dengan fluida di antaranya. Pelat atas bergerak dengan velocity v , pelat bawah stasioner. Untuk maintain motion, diperlukan force F yang berbanding lurus dengan:

- Area pelat (A)
- Velocity (v)
- Berbanding terbalik dengan gap (h)

2. Persamaan Newton untuk Fluida

Hukum Newton tentang Viskositas:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

Di mana:

- τ (tau) = shear stress (Pa atau N/m²)
- η (eta) = dynamic viscosity (Pa·s atau cP)
- $\dot{\gamma}$ (gamma dot) = shear rate (s⁻¹)

Shear Stress (τ):

$$\tau = \frac{F}{A}$$

- F = force applied (N)
- A = area (m²)

Shear Rate ($\dot{\gamma}$):

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy}$$

- dv/dy = velocity gradient perpendicular to flow direction
- Units: s⁻¹ atau reciprocal seconds

Simplified untuk parallel plates:

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h}$$

- v = velocity pelat bergerak
- h = gap antara pelat

3. Dua Jenis Viskositas

a. Dynamic (Absolute) Viscosity (η)

- Measured directly oleh rotational viscometers
- Units:
 - SI: Pascal-second (Pa·s)

- CGS: Poise (P) atau centipoise (cP)
- Conversion: $1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ P} = 1000 \text{ cP}$
- Contoh: water at $20^\circ\text{C} \approx 1.0 \text{ cP}$

b. Kinematic Viscosity (ν , ν)

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

- ν = kinematic viscosity (m^2/s atau cSt)
- ρ = density (kg/m^3)
- Units:
 - SI: m^2/s
 - CGS: Stokes (St) atau centistokes (cSt)
 - Conversion: $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} = 10^6 \text{ cSt}$
- Measured by capillary viscometers (Ostwald, Ubbelohde)
- Relevant when gravity-driven flow important
- Example: Water at 20°C :
 - $\eta \approx 1.0 \text{ cP}$ (dynamic)
 - $\rho \approx 1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$
 - $\nu = 1.0 / 1.0 = 1.0 \text{ cSt}$ (kinematic)

4. Basis Molekuler Viskositas

Viskositas berasal dari:

a. Intermolecular Forces

- Stronger forces (H-bonding, dipole-dipole) \rightarrow higher viscosity
- Example: glycerol (multiple OH groups) sangat viscous

b. Molecular Size dan Shape

- Larger molecules \rightarrow higher viscosity
- Asymmetric/elongated molecules \rightarrow higher viscosity
- Polymers: viscosity increases dramatically dengan molecular weight

c. Temperature Effect

Andrade Equation:

$$\eta = A \cdot e^{B/T}$$

Di mana:

- A, B = constants (specific untuk fluid)
- T = absolute temperature (K)

Arrhenius-like Behavior:

$$\ln(\eta) = \ln(A) + \frac{E_a}{RT}$$

- E_a = activation energy for flow
- R = gas constant (8.314 J/mol·K)

Practical Implication:

- Viscosity umumnya decreases dengan increasing temperature
- Typical: 2-3% decrease per °C untuk water-like liquids
- Polynomial approximation: $\eta(T_2) \approx \eta(T_1) \times [1 - \alpha(T_2 - T_1)]$
- $\alpha \approx 0.02-0.03 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ untuk aqueous systems

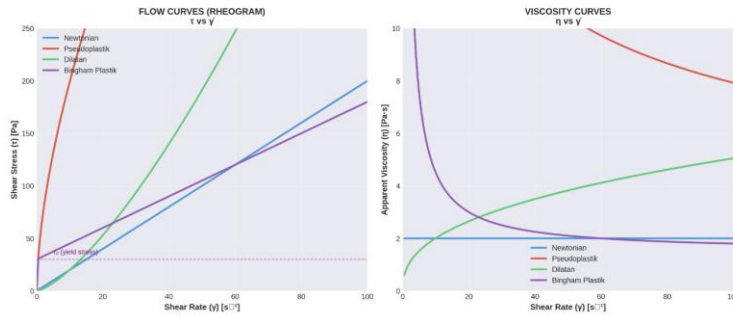
Temperature Control Critical:

- $\pm 0.1^\circ\text{C}$ untuk precision measurements
- $\pm 0.5^\circ\text{C}$ untuk routine QC
- Use circulating water bath atau Peltier temperature control

B. RHEOLOGI: FLUIDA NEWTONIAN VS NON-NEWTONIAN

Rheology = ilmu tentang deformation dan flow of matter.

Lihat Gambar 4 untuk visualisasi lengkap flow curves dan viscosity curves untuk berbagai jenis fluida.



Gambar 4. visualisasi lengkap flow curves dan viscosity curves

1. Fluida Newtonian

Definition: Fluida yang follows Newton's law ($\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$) di mana η adalah constant (independent of shear rate).

Karakteristik:

- Linear relationship antara τ dan $\dot{\gamma}$
- Viscosity tidak berubah dengan shear rate
- Single viscosity value mendeskripsikan fluid completely
- Time-independent

Examples dalam Farmasi:

- Water, ethanol, glycerin
- Light oils (mineral oil, vegetable oil)
- Simple solutions (API dalam solvent, jika concentration rendah)

Flow Curve: Straight line melalui origin dengan slope = η .

2. Fluida Non-Newtonian

Majority pharmaceutical formulations are non-Newtonian. Viscosity changes dengan shear rate.

a. Pseudoplastik (Shear-Thinning)

Definition: Viscosity decreases dengan increasing shear rate. Most common type dalam farmasi.

Characteristics:

- η apparent = $\tau / \dot{\gamma}$ decreases as $\dot{\gamma}$ increases
- "Thins out" saat dikocok/diaduk

- "Thickens" saat left undisturbed
- Easier to pour/spread saat sheared

Mechanism:

- Polymer chains/particle aggregates align dengan flow direction pada high shear
- Reduced entanglement/interaction
- Lower resistance to flow

Examples:

- Polymer solutions (carboxymethylcellulose, methylcellulose)
- Emulsions (creams, lotions)
- Suspensions (antacids, antibiotics oral suspensions)
- Blood (RBC alignment)

Mathematical Models:

Power Law (Ostwald-de Waele):

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$$

atau

$$\eta_{app} = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

Di mana:

- K = consistency index ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$)
- n = flow behavior index (dimensionless)
- $n < 1$: pseudoplastic
- $n = 1$: Newtonian
- $n > 1$: dilatant

Pharmaceutical Relevance:

- Shear-thinning ideal untuk many applications:
 - Easy to pour dari bottle (high shear)
 - Remains on skin/mucosa setelah application (low shear)
 - Easy to swallow (high shear in throat)

b. Dilatan (Shear-Thickening)

Definition: Viscosity increases dengan increasing shear rate. Rare dalam farmasi.

Characteristics:

- η apparent increases as $\dot{\gamma}$ increases
- "Thickens" saat dikocok cepat
- Can solidify temporarily under sudden impact

Mechanism:

- Densely packed particles form rigid structure under shear
- Fluid cannot lubricate particle movement
- Increased friction

Examples:

- Concentrated starch suspensions (cornstarch in water - "oobleck")
- Some high-solid-content suspensions
- Wet sand

Pharmaceutical Relevance:

- Generally undesirable (difficult to process)
- Can indicate formulation problem (overload of solids)

c. Plastik Bingham

Definition: Behaves as solid below certain stress (yield stress τ_0), then flows as Newtonian liquid above τ_0 .

Bingham Equation:

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\gamma}$$

Di mana:

- τ_0 = yield stress (Pa)
- η_p = plastic viscosity (Pa·s)

Characteristics:

- No flow until $\tau > \tau_0$
- Once flowing, behaves linearly (like Newtonian)

- Structure breaks down at yield point

Examples:

- Toothpaste
- Ointments
- Some gels
- Mayonnaise, ketchup

Pharmaceutical Relevance:

- Desirable untuk products yang must stay in place:
 - Toothpaste pada brush
 - Topical gel pada skin
 - Ophthalmic ointment dalam eye

d. Thixotropi (Time-Dependent Shear-Thinning)

Definition: Viscosity decreases over time under constant shear, recovers saat shear removed.

Characteristics:

- Time-dependent viscosity reduction
- Structure breakdown (reversible)
- Hysteresis loop pada up-down shear rate curve
- Recovery time: seconds to hours

Mechanism:

- Weak structure (gel network, particle flocs) breaks down under shear
- Rebuilds slowly when left undisturbed

Examples:

- Paints (easy to brush, doesn't drip)
- Yogurt
- Bentonite suspensions
- Some pharmaceutical gels

Quantification: Thixotropic Index (TI): Area between up-curve dan down-curve pada flow curve (hysteresis loop).

e. Rheopecti (Time-Dependent Shear-Thickening)

Definition: Viscosity increases over time under constant shear. Very rare.

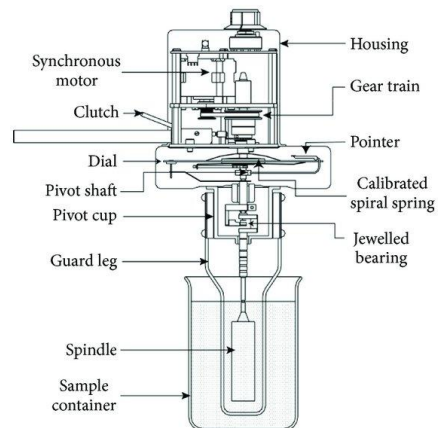
Example: Some gypsum pastes, specialized lubricants.

C. C. VISKOMETER BROOKFIELD: PRINSIP DAN KOMPONEN

Brookfield rotational viscometer menggunakan prinsip drag-force measurement.

1. 1. Prinsip Kerja

Basic Principle: Spindle (cylindrical atau disc-shaped) dirotasi dalam fluid. Viscous drag fluid terhadap spindle measured via calibrated spring deflection.



Gambar 5. Viskometer Brookfield dan bagiannya.

Measurement Chain:

1. Motor rotates spindle at constant speed (RPM)
2. Fluid exerts viscous drag (torque) pada spindle
3. Torque deflects calibrated beryllium-copper spring
4. Spring deflection measured via rotary transducer (optical atau magnetic)
5. Torque converted ke viscosity (cP) via calibration constants

Formula:

$$\eta = \frac{T \cdot SMC}{RPM}$$

Di mana:

- η = viscosity (cP)
- T = torque (measured, % of full-scale)
- SMC = Spindle Multiplier Constant (specific untuk setiap spindle)
- RPM = rotational speed

2. 2. Komponen Utama

a. Motor dan Drive

- Brushless DC motor atau synchronous AC motor
- Speed control: electronic (crystal-controlled)
- Speed range: 0.3-200 RPM (model-dependent)
- Accuracy: $\pm 1\%$ of set speed

b. Calibrated Spring

- Beryllium-copper alloy (excellent elasticity, low drift)
- Torque range defines viscometer model:
 - LV (Low Viscosity): $1-2 \times 10^6$ cP (low torque)
 - RV (RV): $100-13 \times 10^6$ cP (medium torque)
 - HA, HB (High): higher torque for very viscous materials
- Full-scale torque: 7187 dyne·cm (LV), 14,374 dyne·cm (RV)

c. Spindle Set Berbagai ukuran/shape untuk different viscosity ranges.

LV Spindle Set (4 spindles):

- LV-1: small cylinder (smallest drag)
- LV-2: medium cylinder
- LV-3: large cylinder
- LV-4: disc (largest drag)

RV Spindle Set (7 spindles):

- RV-1: small (optional, not always included)
- RV-2 through RV-7: progressively larger

Spindle Material:

- Stainless steel 316 (corrosion resistance)
- Precision machined (tolerances < 0.01 mm)

Spindle Geometry determines shear rate:

- Larger spindle → higher drag → measures lower viscosity
 - Smaller spindle → lower drag → measures higher viscosity
- d. Guard Leg (LV dan RV models)
- U-shaped metal band
 - Encloses spindle
 - Functions:
 - Defines measurement geometry (required untuk calibration validity)
 - Protects spindle dari damage
 - Reproduces container effect
- e. Temperature Jacket atau Water Bath Adapter
- For temperature control
 - Circulating water from external bath
 - Maintains $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ stability
- f. Digital Display Modern instruments:
- LCD/LED display
 - Shows: viscosity (cP atau $\text{mPa}\cdot\text{s}$), % torque, speed (RPM), temperature
 - Data output: RS-232, USB untuk PC logging
 - 21 CFR Part 11 compliance (audit trail) pada advanced models

3. 3. Measurement Geometry

Infinite Sea vs Defined Container:

a. Infinite Sea (Large Container)

- Spindle centered dalam container ≥ 600 mL
- Container diameter $\geq 2\times$ spindle diameter
- Container depth ensures spindle fully immersed + clearance
- Calibration valid

b. Small Sample Adapter (SSA)

- For limited sample volumes (6-16 mL)
- Specific adapter per spindle

- Different calibration constants
- Used for expensive/precious samples
 - c. UL Adapter (Ultra-Low Volume)
- 2-7 mL sample
- Special small spindles
- For R&D, expensive APIs

4. 4. Shear Rate Calculation

Untuk cylindrical spindle dalam infinite sea:

$$\dot{\gamma}_{avg} = \frac{2\omega R_s^2}{R_c^2 - R_s^2}$$

Di mana:

- ω = angular velocity (rad/s) = $2\pi N/60$ (N = RPM)
- R_s = spindle radius
- R_c = container radius (for infinite sea, $R_c \rightarrow \infty$, formula simplifies)

Brookfield Simplified: Brookfield provides shear rate constant (SRC)

untuk each spindle/speed combination:

$$\dot{\gamma} = SRC \times RPM$$

Example:

- LV-4 spindle at 60 RPM
- $SRC \approx 4.8 \text{ s}^{-1}/\text{RPM}$
- $\dot{\gamma} = 4.8 \times 60 = 288 \text{ s}^{-1}$

Shear Rate Range:

- Low shear: $0.1\text{-}10 \text{ s}^{-1}$ (storage, settling)
- Medium shear: $10\text{-}100 \text{ s}^{-1}$ (pouring, spreading)
- High shear: $100\text{-}10,000 \text{ s}^{-1}$ (mixing, pumping, spraying)

Brookfield covers low-to-medium shear (most relevant for pharmaceutical QC).

D. D. PROSEDUR PENGUKURAN STANDAR

1. 1. Persiapan Instrumen

a. Leveling:

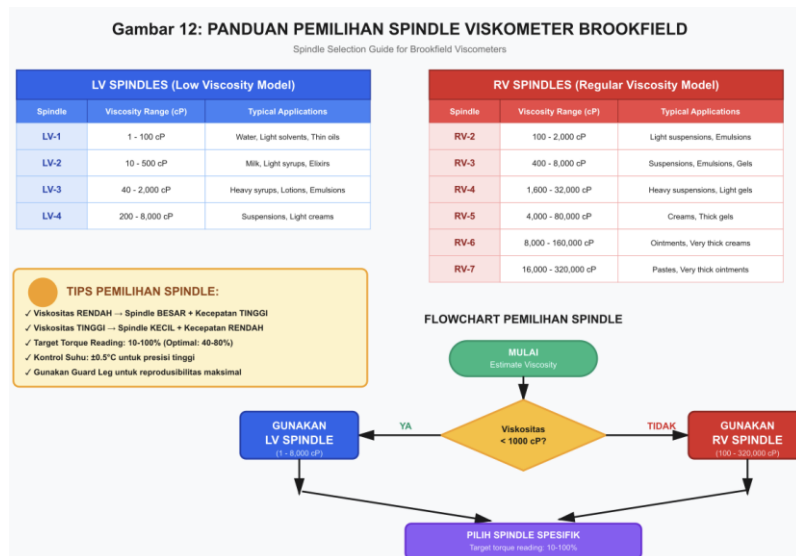
- Place viscometer pada surface yang level
- Use built-in bubble level
- Adjust leveling feet until bubble centered
- Critical: tilt causes eccentric rotation → error

b. Autozero:

- With no spindle attached
- Motor running at test speed
- Zero reading (baseline torque subtraction)
- Must repeat jika speed changed

c. Spindle Selection

Lihat Gambar 6 untuk flowchart pemilihan spindle lengkap.



Gambar 6. Pemilihan spindle

Selection Strategy:

- Estimate viscosity (from literature, preliminary test)
- Choose spindle/speed to give torque reading 10-100%
- < 10%: low accuracy (large % error)

- 100%: overload, invalid reading
- Optimal: 40-80%

Trial and Error Approach:

1. Start dengan spindle mid-range pada speed mid-range (e.g., LV-3 at 30 RPM)
2. Jika torque < 10%: use larger spindle atau lower speed
3. Jika torque > 100%: use smaller spindle atau higher speed
4. Iterate sampai dalam range

2. 2. Sample Preparation

a. Temperature Equilibration:

- Bring sample dan container ke test temperature
- Minimum 30 min equilibration
- Use water bath atau incubator

b. Degassing (jika ada bubbles):

- Vacuum degassing
- Or centrifugation
- Or wait for bubbles to rise/dissipate
- Bubbles cause erratic readings

c. Homogeneity:

- Mix gently (avoid air incorporation)
- For suspensions: ensure uniform dispersion
- For emulsions: check for phase separation

3. 3. Pengukuran

a. Container dan Volume:

- Standard: 600 mL beaker (low-form)
- Fill height: spindle immersed ke groove mark (typically 3-4 cm from tip)
- Spindle centered (equidistant dari walls dan bottom)

b. Immersion:

- Lower spindle slowly (avoid air bubbles on surface)
- For disc spindle: tilt slightly during immersion

- Immerse ke marked groove (notch pada shaft)
- c. Spindle Attachment:
 - Screw spindle onto shaft (LEFT-HAND THREAD - turn counterclockwise to tighten!)
 - Common mistake: right-hand threading damages coupling
- d. Start Measurement:
 - Start motor
 - Reading will fluctuate initially
 - Wait for stabilization:
 - Newtonian: 30 sec - 2 min
 - Non-Newtonian: may take longer (5-10 min)
 - Thixotropic: reading decreases over time
- e. Reading:
 - Record once stable ($< 1\%$ change over 30 sec)
 - For non-Newtonian: decide on time point (e.g., 1 min after start)
 - Duplicate measurements: RSD $< 5\%$ untuk good repeatability

4. 4. Cleaning

- Immediately after use
- Remove spindle
- Rinse dengan appropriate solvent
- For aqueous samples: water
- For oily samples: detergent, then water, then ethanol
- Dry thoroughly (lint-free tissue atau air dry)
- Inspect untuk scratches/corrosion

E.

E. APLIKASI DALAM FARMASI

1. 1. Quality Control Sediaan Liquid

a. Sirup/Elixir:

- Typical viscosity: 50-500 cP
- Spindle: LV-2 atau LV-3 at 60 RPM

- Specification: $\pm 20\%$ dari target
- Purpose: ensure consistency, pourability
- b. Suspensi (Oral):
- Typical: 500-5000 cP (pseudoplastic)
- Spindle: LV-4 atau RV-2/3 at 20-60 RPM
- Purpose: adequate suspendability, easy resuspension
- Studi Kasus: Antibiotik Suspensi
- Target viscosity: 2500 ± 500 cP at 20 RPM (RV-3 spindle)
- Too low (< 2000 cP): rapid sedimentation, caking
- Too high (> 3000 cP): difficult to pour, poor redispersibility
- c. Emulsi:
- Wide range depending on type (O/W, W/O)
- Lotions: 1,000-10,000 cP
- Creams: 50,000-200,000 cP
- Purpose: texture, spreadability, stability

2. 2. Sediaan Semi-Solid

a. Gel:

- Typical: 5,000-100,000 cP (thixotropic, Bingham plastic)
- Spindle: RV-5/6/7 atau T-bar spindles (special)
- Low speed: 2.5-10 RPM
- Purpose: spreadability, structure maintenance

b. Ointment/Cream:

- Very high viscosity (often $> 100,000$ cP)
- May require cone-plate rheometer untuk accurate measurement
- Brookfield with T-bar adapters: qualitative comparison

c. Paste:

- Extremely high viscosity/plastic behavior
- Yield stress measurement important
- Requires advanced rheometers atau penetrometers

3. 3. Formulation Development

a. Rheology Modifier Optimization:

- Test various concentrations polymer/gum
- Plot viscosity vs concentration
- Determine minimum effective level
- Example: CMC untuk suspensi, Carbomer untuk gel

b. Stability Indicating:

- Viscosity change over time indicates instability:
 - Increase: gelation, polymerization
 - Decrease: degradation, phase separation
- Accelerated conditions (elevated temperature)
- Weekly measurements for 3-6 months

c. Process Optimization:

- Mixing time: viscosity reaches plateau
- Temperature effects: validate processing temperature
- Shear history: assess shear-sensitivity

4. 4. Dissolution Media Characterization

- Modified dissolution media (surfactants, polymers) have altered viscosity
- Affects hydrodynamics, diffusion layer thickness
- Must measure dan report viscosity untuk repeatability

F. TROUBLESHOOTING COMMON PROBLEMS

Problem	Possible Cause	Solution
Reading tidak stabil (fluctuates)	<ul style="list-style-type: none"> • Bubbles dalam sample • Temperature fluctuations • Vibration • Settling/creaming 	<ul style="list-style-type: none"> • Degas sample • Equilibrate temperature ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) • Place pada stable surface • Homogenize before measurement
Reading terus turun	<ul style="list-style-type: none"> • Thixotropic breakdown • Heating from shear • Sample evaporation 	<ul style="list-style-type: none"> • Expected untuk thixotropic • Control room temperature • Cover sample (cap with hole untuk spindle)
Torque > 100%	<ul style="list-style-type: none"> • Viscosity too high untuk spindle/speed 	<ul style="list-style-type: none"> • Use smaller spindle • Increase speed • Dilute sample (if acceptable)
Torque < 10%	<ul style="list-style-type: none"> • Viscosity too low untuk spindle/speed 	<ul style="list-style-type: none"> • Use larger spindle • Decrease speed • Use LV model instead of RV
Different reading di edge vs center	<ul style="list-style-type: none"> • Non-homogeneous sample • Phase separation • Sedimentation 	<ul style="list-style-type: none"> • Mix gently dan thoroughly • Check sample integrity • Measure promptly setelah mixing
Readings higher than expected	<ul style="list-style-type: none"> • Spindle not fully immersed • Spindle touching container wall/bottom • Wrong calibration constant 	<ul style="list-style-type: none"> • Immerse ke groove mark • Center spindle properly • Verify spindle selection dalam software

Poor repeatability (RSD > 5%)	<ul style="list-style-type: none"> • Inconsistent sample prep • Temperature variation • Timing not standardized 	<ul style="list-style-type: none"> • Standardize SOP strictly • Use water bath • Record readings at specific time
-------------------------------	--	--

G. KALIBRASI DAN VERIFIKASI

1. Prinsip Kalibrasi

Viscometer dikalibrasi menggunakan standard viscosity fluids dengan known viscosity (traceable to NIST).

Brookfield Viscosity Standards:

- Silicone oils atau mineral oils
- Available range: 5 cP to 100,000 cP
- Temperature-specified (typically 25°C)
- Certificate of Analysis dengan actual viscosity ($\pm 1\%$)

2. Verification Procedure (USP <1911>)

Frequency:

- Daily (or each use): performance verification
- Quarterly: full calibration check
- Annual: full service dan re-certification (by qualified technician)

Performance Verification:

1. Measure viscosity standard at specified RPM/spindle
2. Compare measured vs certified value
3. Acceptance: within $\pm 2\%$ of certified (or per manufacturer spec)
4. If fail: troubleshoot atau send untuk service

Example:

- Standard: 100 cP silicone oil at 25°C
- Spindle: LV-2 at 60 RPM

- Expected reading: 100 ± 2 cP
- Measured: 101.3 cP → PASS

3. Spindle Integrity Check

- Visual inspection: scratches, corrosion, dents
- Dimensional check (dengan micrometer): within tolerances
- Replace if damaged (scratches affect calibration)

4. Speed Verification

- Stroboscope method
- Built-in self-test (advanced instruments)
- Acceptance: $\pm 1\%$ of set speed

H. ADVANCED RHEOMETRY (Beyond Brookfield)

Brookfield excellent untuk QC routine, tapi limited untuk comprehensive rheological characterization. Advanced applications require:

1. Cone-Plate Rheometer

- Geometry: cone (1-4° angle) rotating pada flat plate
- Advantage: uniform shear rate across entire sample
- Typical sample volume: 0.5-2 mL
- Shear rate range: $0.01-10,000$ s⁻¹
- Used for: detailed flow curves, yield stress determination

2. Parallel-Plate Rheometer

- Two parallel circular plates
- Gap adjustable (0.05-5 mm)
- Larger samples than cone-plate
- Used for: semi-solids, samples dengan particles

3. Oscillatory Rheometry

- Small amplitude oscillatory shear (SAOS)
- Measures:
 - G' (storage modulus) = elastic component
 - G'' (loss modulus) = viscous component
 - $\tan \delta = G''/G' =$ balance elastic/viscous

- Applications:
 - Gel structure characterization
 - Yield stress determination
 - Viscoelastic behavior (creep, recovery)
 - Frequency sweeps, amplitude sweeps, temperature ramps

Pharmaceutical Relevance:

- Gel structure ($G' > G'' = \text{true gel}$)
- Cream texture (balance G' dan G'')
- Prediction stability (G' changes over time)

4. Capillary Viscometry

- Gravity-driven flow through capillary
- Measures kinematic viscosity (ν)
- Very precise untuk low-viscosity Newtonian fluids
- Used for: solvent viscosity, polymer molecular weight determination
- Pharmacopeial method (USP <911>)

I. REGULATORY DAN COMPLIANCE

1. Pharmacopeial Standards

USP <912> Rotational Rheometer Methods:

- Equipment specifications
- Calibration requirements
- Standard operating procedures
- Data acceptance criteria

Ph.Eur. 2.2.10 Viscosity - Rotational Viscometry:

- European equivalent standard
- Similar requirements dengan USP

2. 21 CFR Part 11 Compliance

Modern Brookfield instruments offer:

- Electronic records dengan integrity (ALCOA+)
- Audit trails (all changes logged)
- User access controls (passwords, privilege levels)

- Electronic signatures
- Data encryption

Critical untuk GMP manufacturing dan regulatory submissions.

3. Validation Parameters

Installation Qualification (IQ):

- Equipment specifications match purchase order
- Utilities available (power, temperature control)
- Documentation complete

Operational Qualification (OQ):

- Speed verification (all speeds)
- Torque calibration (all ranges)
- Temperature control (if equipped)
- Alarm functions

Performance Qualification (PQ):

- Measure viscosity standards (3 different viscosities)
- Demonstrate precision (RSD < 3%)
- Demonstrate accuracy ($\pm 2\%$ of certified)
- Stability over time

J. EMERGING TECHNOLOGIES

1. Inline Viscometry untuk Continuous Manufacturing

Menurut SNS Insider (2025), inline viscosity sensors mengalami pertumbuhan signifikan, driven by:

Advantages Inline:

- Real-time monitoring during production
- Immediate feedback untuk process control
- Reduced sampling dan off-line testing
- Support PAT (Process Analytical Technology) initiatives
- Integration dengan automation systems

Applications:

- Continuous syrup manufacturing

- Emulsion production
- Coating solutions
- Sterile liquid filling

Technologies:

- Vibrating element sensors
- Rotational inline viscometers
- Ultrasonic viscometry
- Microfluidic sensors

2. High-Throughput Rheology

- Microplate rheometers
- Parallel measurements (96-well plates)
- Applications: formulation screening, DoE studies
- Minimal sample requirement (< 50 μL)

3. Artificial Intelligence Integration

- Predictive modeling: viscosity from formulation composition
- Process optimization: ML algorithms untuk adjust parameters real-time
- Quality prediction: early detection deviations

Tablet merupakan bentuk sediaan obat yang paling populer di dunia farmasi, menyumbang lebih dari 70% dari semua bentuk sediaan oral. Popularitas tablet disebabkan oleh beberapa keunggulan: dosis akurat, stabilitas kimia dan fisik yang baik, kemudahan produksi massal, portabilitas tinggi, dan penerimaan pasien yang excellent.

Proses manufaktur tablet melibatkan kompresi powder atau granul menggunakan mesin cetak tablet (tablet press). Proses ini tampak sederhana - hanya "menekan bubuk menjadi tablet" - namun sebenarnya melibatkan fenomena fisika yang kompleks termasuk deformasi material, konsolidasi partikel, pembentukan ikatan antar-partikel, dan relaxasi elastis.

Menurut laporan industri terkini, pasar global tablet compression machines mencapai USD 2.47 miliar pada tahun 2025 dan diproyeksikan tumbuh menjadi USD 4.68 miliar pada 2033 dengan CAGR 8.3%. Pertumbuhan ini didorong oleh meningkatnya produksi farmasi global, adopsi otomasi, dan tren menuju continuous manufacturing (Tablet Compression Machines Market, 2025).

A. PRINSIP FISIKA DASAR KOMPRESI TABLET

1. Mekanika Material dalam Kompresi

Ketika gaya kompresi diterapkan pada powder dalam die, material mengalami deformasi. Respons material terhadap gaya ini ditentukan oleh sifat mekanik intrinsiknya.

Persamaan Fundamental Stress-Strain:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Di mana:

- σ = tensile stress atau compressive stress (Pa atau N/m²)
- F = gaya yang diterapkan (N)
- A = area cross-section (m²)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Di mana:

- ε = strain (deformasi relatif, tanpa satuan)
- ΔL = perubahan panjang
- L_0 = panjang awal

Modulus Elastisitas (Young's Modulus):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Modulus elastisitas menggambarkan kekakuan material. Material dengan E tinggi (seperti gula kristal) sangat kaku dan sulit dideformasi elastis. Material dengan E rendah (seperti MCC) lebih mudah dideformasi.

2. Tiga Mekanisme Deformasi Material

Material farmasi merespons tekanan kompresi melalui tiga mekanisme utama:

a. Deformasi Elastis (Reversible)

- Material terdeformasi tetapi kembali ke bentuk awal setelah gaya dihilangkan
- Diatur oleh Hukum Hooke: $\sigma = E \cdot \varepsilon$ (dalam regime elastic)
- Energi tersimpan sebagai elastic strain energy
- Contoh material: microcrystalline cellulose (MCC) pada stress rendah

Elastic Recovery: Setelah kompresi, tablet mengalami elastic recovery - ekspansi kecil karena pelepasan elastic strain energy. Recovery ini adalah:

$$\text{Elastic Recovery} = \frac{h_{final} - h_{under\ compression}}{h_{under\ compression}} \times 100\%$$

Typical elastic recovery: 1-5% untuk tablet yang baik. Excessive recovery (> 10%) menyebabkan capping/lamination.

b. Deformasi Plastik (Irreversible)

- Material mengalami permanent deformation
- Tidak kembali ke bentuk awal setelah gaya dihilangkan
- Sangat penting untuk pembentukan tablet yang kohesif
- Terjadi setelah yield point terlampaui
- Contoh material: MCC, sodium chloride (highly plastic)

Yield Stress (σ_y): Stress minimum di mana deformasi plastik dimulai.

Material dengan σ_y rendah mudah mengalami plastic deformation (desirable untuk tableting).

c. Fragmentasi (Brittle Fracture)

- Material pecah menjadi partikel yang lebih kecil
- Terjadi pada material brittle/getas
- Meningkatkan surface area dan bonding sites
- Contoh material: lactose, spray-dried lactose

3. Konsolidasi dan Kompaksi Powder

Ketika powder dikompres dalam die, terjadi sequence of events yang disebut konsolidasi:

Tahap 1: Particle Rearrangement (0-5% porosity reduction)

- Partikel bergerak mengisi void spaces
- Mekanisme: sliding dan rolling partikel
- Energi minimal diperlukan
- Terjadi pada compression pressure rendah (< 5 MPa)

Tahap 2: Elastic Deformation (5-15% porosity reduction)

- Partikel terdeformasi elastis pada contact points
- Meningkatkan area kontak antar-partikel
- Reversible jika pressure released
- Terjadi pada moderate pressure (5-50 MPa)

Tahap 3: Plastic Deformation (15-35% porosity reduction)

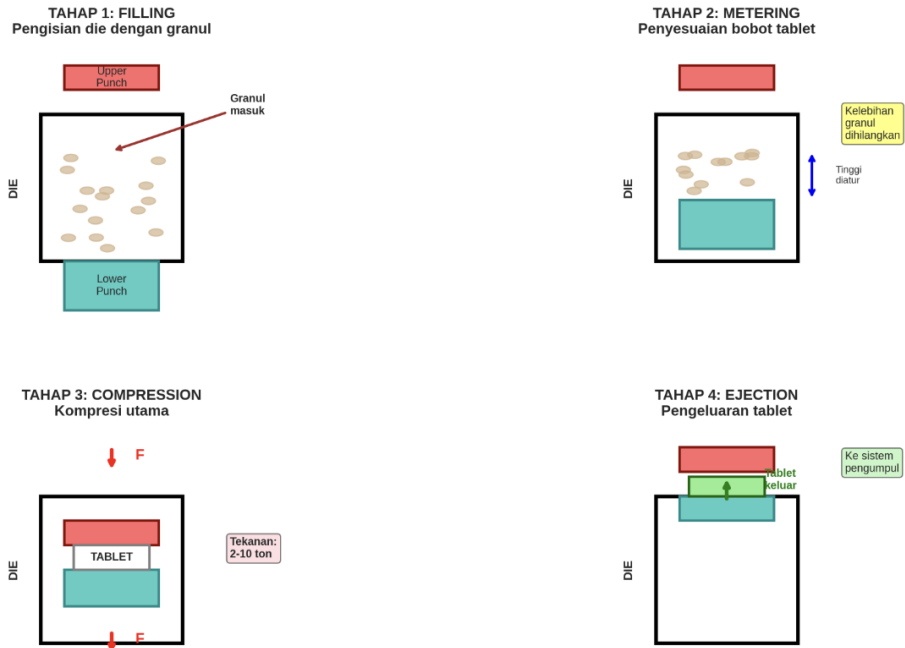
- Deformasi plastik dominan
- Pembentukan bonding antar-partikel
- Permanent densification

- Terjadi pada higher pressure (50-200 MPa)

Tahap 4: Fragmentation (if applicable)

- Untuk brittle materials
- Particle breakdown increases bonding sites
- Can occur simultaneously with plastic deformation

Lihat Gambar 7 untuk visualisasi lengkap 4 tahap siklus kompresi tablet.



Gambar 7 . Siklus kompresi tablet

4. Persamaan Heckel: Analisis Compaction Behavior

Persamaan Heckel adalah tool penting untuk mengkarakterisasi compaction behavior powder:

$$\ln \left(\frac{1}{1-D} \right) = k \cdot P + A$$

Di mana:

- D = densitas relatif = $\rho_{\text{tablet}} / \rho_{\text{true}}$
- ρ_{tablet} = apparent density tablet pada tekanan P
- ρ_{true} = true density material
- P = applied pressure (MPa)

- k = slope dari linear region (konstanta Heckel)
- A = intercept

Interpretasi Parameter Heckel:

a. Slope (k) \rightarrow Yield Stress:

$$P_y = \frac{1}{k}$$

- P_y = mean yield pressure (MPa)
- Material dengan P_y rendah = deformasi plastik mudah (desirable)
- Material dengan P_y tinggi = material keras, sulit kompres

Contoh:

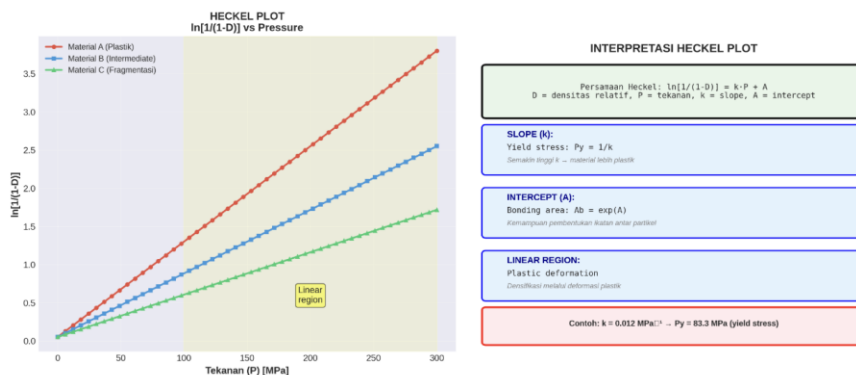
- MCC: $k \approx 0.036 \text{ MPa}^{-1} \rightarrow P_y \approx 28 \text{ MPa}$ (very plastic)
- Lactose: $k \approx 0.012 \text{ MPa}^{-1} \rightarrow P_y \approx 83 \text{ MPa}$ (fragmentasi dominan)
- NaCl: $k \approx 0.077 \text{ MPa}^{-1} \rightarrow P_y \approx 13 \text{ MPa}$ (extremely plastic)

b. Intercept (A) \rightarrow Bonding Area:

$$A_b = \exp(A)$$

- A_b = initial relative bonding area
- Menggambarkan particle rearrangement dan initial densification
- Typical range: $A = 0.5 - 2.0$

Lihat Gambar 8 untuk plot Heckel lengkap dan interpretasi untuk berbagai material.



Gambar 8. Plot Hackel lengkap

Catatan Penting: Heckel plot harus linear pada region tekanan tinggi (biasanya 50-200 MPa). Non-linearity atau multiple slopes mengindikasikan perubahan mekanisme deformasi atau time-dependent effects.

5. 5. Bonding Mechanisms antar-Partikel

Untuk membentuk tablet yang kohesif, partikel harus saling berikatan. Ada 5 mekanisme bonding utama:

a. Solid Bridges (Ikatan Padat)

- Terbentuk saat material meleleh (fusion) atau recrystallization
- Paling kuat tapi jarang dalam dry compression
- Contoh: meltable materials (PEG, Gelucire) pada hot compression

b. Intermolecular Forces (Van der Waals)

- Gaya London, dipole-dipole, hydrogen bonding
- Effective pada jarak sangat dekat (< 1 nm)
- Meningkatkan dengan deformasi plastik (increased contact area)
- Dominant mechanism dalam kebanyakan tablet

c. Mechanical Interlocking

- Particle shapes interlock secara fisik
- Penting untuk fibrous materials
- Lebih lemah dibanding bonding kimia

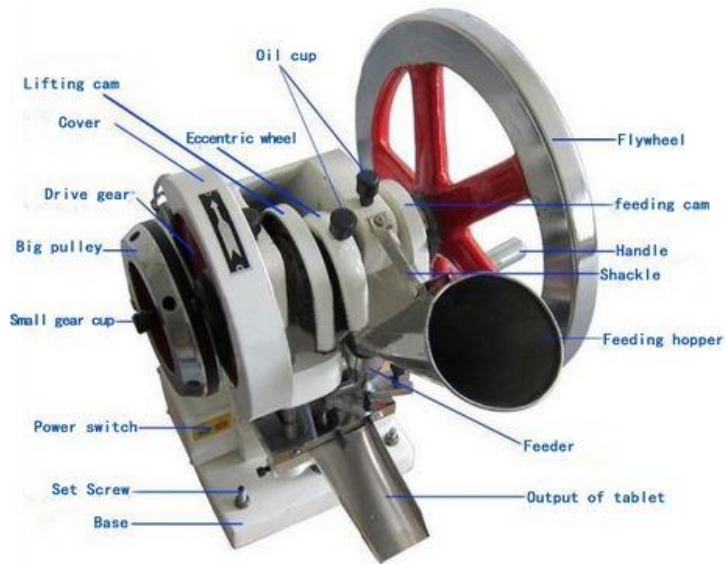
d. Electrostatic Forces

- Muatan surface menarik partikel opposite charge
- Minor contributor pada typical pharmaceutical powders
- Dapat menyebabkan problem (e.g., segregation) jika excessive

e. Liquid Bridges (Capillary Forces)

- Moisture atau liquid binder forms bridges
- Temporary but can evolve to solid bridges
- Penting dalam wet granulation, less in direct compression

B. KOMPONEN MESIN CETAK TABLET



Gambar 8. Mesin Cetak Tablet

1. Hopper dan Feed Frame

Hopper:

- Menyimpan dan supply powder/granul ke feed frame
- Design: typically conical atau pyramidal untuk flow optimization
- Material: stainless steel 316L (GMP compliant)
- Features: agitator untuk prevent bridging/rat-holing

Feed Frame:

- Distributes powder uniformly ke die cavities
- Rotating paddle atau scraper ensures consistent fill
- Adjustable speed: sync dengan turret rotation
- Critical untuk weight uniformity

Fill Depth Adjustment: Mengatur berapa banyak powder yang masuk ke die. Formula:

$$m = \rho_b \cdot V = \rho_b \cdot A_{die} \cdot h_{fill}$$

Di mana:

- m = tablet mass (mg)
- ρ_b = bulk density powder (g/cm^3)

- A_{die} = die area (cm^2)
- h_{fill} = fill depth (cm)

2. Die Cavity

- Cylindrical hole tempat powder dikompres
 - Material: hardened steel (Rockwell C 58-62)
 - Precision machining: toleransi ± 0.002 mm
 - Diameter: 3-25 mm (most common: 6-12 mm)
 - Surface finish: polished ($R_a < 0.4 \mu\text{m}$) untuk minimize sticking
- Die Bore Specification:
- Straight bore: uniform diameter
 - Tapered bore: slight taper ($0.5-1^\circ$) untuk facilitate ejection
 - Depth: typically $2-3\times$ tablet thickness

3. Punches (Upper & Lower)

Punches apply compression force. Terdiri dari:

Anatomy of a Punch:

- Punch tip: kontak dengan powder, determines tablet shape
- Punch barrel: guides punch movement dalam turret
- Punch stem: connects barrel to head
- Punch head: contact surface dengan cam track

Punch Shapes:

- Flat-faced: simplest, sharp edges (chipping risk)
- Shallow concave (SC): slight curve, standard untuk most tablets
- Deep concave (DC): pronounced curve, untuk tablet besar
- Convex: rare, special shapes
- Embossed/Debossed: dengan logo atau huruf

Punch Material:

- Tool steel (D2, S7): most common, good wear resistance
- Carbide-tipped: extreme hardness untuk abrasive formulations
- Stainless steel: untuk specialized applications

Punch Tip Coating:

- Chromium plating: anti-stick, easy cleaning
- Chrome nitride: extremely hard, untuk abrasive APIs
- Teflon coating: non-stick, untuk sticky formulations

4. Compression Mechanism: Cam Tracks dan Rollers

Upper Cam Track:

- Guides upper punch vertical movement
- Sections:
 - Entry: punch elevates (out of die)
 - Pre-compression: punch descends, applies initial force
 - Main compression: punch at lowest point, maximum force
 - Ejection preparation: punch elevates

Lower Cam Track:

- Guides lower punch vertical movement
- Mirrors upper cam but inverse
- Adjustable untuk control tablet thickness

Compression Rollers: Rollers apply force pada punch heads untuk compress powder.

a. Pre-compression Roller (optional, on advanced presses):

- Applies gentle force (5-20% of main)
- Functions:
 - Removes entrapped air dari powder
 - Initial densification
 - Reduces risk of capping/lamination
- Typical force: 2-10 kN

b. Main Compression Roller:

- Applies final compression force
- Typical force: 5-100 kN (depends on tablet size, formulation)
- Adjustable: hydraulic or mechanical adjustment

- Dwell Time = time under maximum compression $t_{\text{dwell}} = \frac{2}{\omega} \cdot r_{\text{roller}} \cdot \arcsin(d_{\text{contact}}/2r_{\text{roller}})$ Di mana:
 - r_{roller} = roller radius
 - d_{contact} = contact arc length
 - ω = turret angular velocity (rad/s)
 - r_{turret} = turret radius

Dwell time critical untuk:

- Achieving adequate bonding
- Minimizing elastic recovery
- Tablet hardness development

Typical dwell time: 10-50 ms for rotary press, 500-2000 ms for single-punch.

5. Turret

- Rotating disc yang holds punches dan dies
- Material: precision-machined steel, hardened
- Stations: 16-61 pada rotary press (more stations = higher output)
- Speed: 10-120 RPM (typical: 30-60 RPM)

Tablet Output:

$$\text{Output (tablets/hr)} = \text{RPM} \times \text{Stations} \times 60$$

Contoh: 60 RPM, 37 stations → 133,200 tablets/hr

C. SIKLUS KOMPRESI TABLET: 4 TAHAP DETAIL

1. Tahap 1: FILLING (Pengisian Die)

Proses:

- Lower punch positioned low dalam die (menciptakan cavity)
- Upper punch elevated (di luar die)
- Feed frame distributes powder over die table
- Powder falls ke dalam die cavity by gravity
- Excess powder scraped off

Parameter Kritis:

- Fill depth: determines tablet weight
- Powder flowability: critical untuk uniform filling
- Turret speed: too fast → poor filling
- Feed frame paddle speed: must match turret

Flow Requirements:

- Angle of repose: $< 40^\circ$ (good flow)
- Carr's Index: $< 15\%$ (good flow)
- Hausner Ratio: < 1.25 (good flow)

2. Tahap 2: METERING (Penyesuaian Bobot)

Proses:

- Lower punch raises hingga level tertentu
- Excess powder di atas die scraped off oleh dosing blade
- Remaining powder dalam die = exact amount untuk tablet

Dosing Blade (Weight Adjustment):

- Set height lower punch untuk control fill volume
- Precision: ± 0.01 mm affects weight significantly
- Formula: $m \propto h_{\text{fill}}$ (jika ρ_b constant)

Weight Uniformity: USP/Ph.Eur. Requirements:

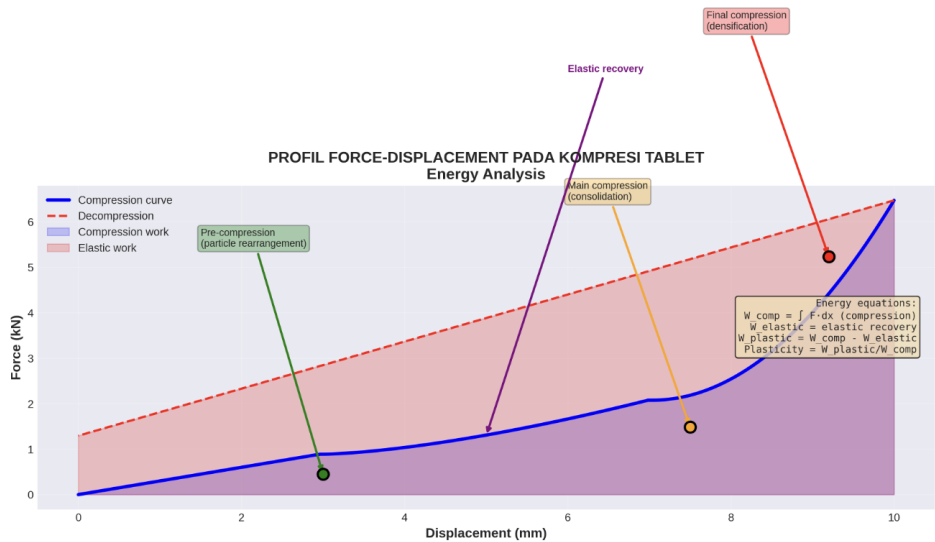
- Tablet weight < 80 mg: $\pm 10\%$
- Tablet weight 80-250 mg: $\pm 7.5\%$
- Tablet weight > 250 mg: $\pm 5\%$

3. Tahap 3: COMPRESSION (Kompresi Utama)

Proses:

- Upper punch descends, enters die
- Lower punch rises simultaneously
- Powder compressed between two punches
- Maximum force applied (2-10 ton typical)
- Dwell time: 10-50 ms

Force Profile: Lihat Gambar 9 untuk force-displacement profile lengkap.



Gambar 9 profil force displacement

Pre-compression (jika ada):

- Force gradually increases
- Air removal
- Initial particle rearrangement
- Typical: 10-20% final force

Main Compression:

- Rapid force increase
- Plastic deformation dominan
- Bond formation
- Achieves target hardness

Peak Force:

- Held briefly (dwell time)
- Critical untuk bonding
- Too short: weak tablet
- Too long: excessive elastic recovery

Energy Analysis:

$$W_{compression} = \int F dx$$

Di mana:

- $W_{\text{compression}}$ = work of compression
- F = force
- x = displacement

Components of Compression Energy:

$$W_{\text{total}} = W_{\text{elastic}} + W_{\text{plastic}}$$

- W_{elastic} = recoverable (causes elastic recovery)
- W_{plastic} = irreversible (permanent densification)

Plasticity Index:

$$PI = \frac{W_{\text{plastic}}}{W_{\text{total}}} \times 100\%$$

High PI (> 70%) indicates good compressibility.

4. Tahap 4: EJECTION (Pengeluaran Tablet)

Proses:

- Upper punch retracts completely (elevates)
- Lower punch rises hingga tablet surface flush dengan die table
- Ejection blade sweeps tablet off die table
- Tablet collected dalam chute

Ejection Force: Force required untuk push tablet out dari die. Formula empiris:

$$F_{\text{ejection}} = \tau \cdot \pi \cdot D \cdot h$$

Di mana:

- τ = shear stress at die wall (Pa)
- D = tablet diameter (m)
- h = tablet height (m)

High Ejection Force (> 20% compression force) indicates:

- Insufficient lubrication
- Die wall wear
- Formulation sticking propensity
- Potential tablet defects (capping, chipping)

Lubrication: Lubricants (magnesium stearate, stearic acid) mengurangi friction:

- Internal lubrication: inter-particle friction
- External lubrication: die wall friction

Typical lubricant concentration: 0.25-1.0% w/w

D. PARAMETER PROSES DAN KUALITAS TABLET

1. Input Parameters (Process Variables)

a. Compression Force

- Range: 5-100 kN (depends on formulation, tablet size)
- Control: $\pm 2\%$ untuk modern presses
- Effect: determines hardness, friability, disintegration

b. Turret Speed (RPM)

- Range: 10-120 RPM
- Higher speed \rightarrow shorter dwell time \rightarrow potential quality issues
- Optimal: balance output vs quality

c. Pre-compression Force (if applicable)

- Typical: 10-30% final force
- Benefits: air removal, reduced lamination

d. Fill Depth

- Controls tablet weight
- Must adjust when formulation density changes
- Precision: ± 0.01 mm

2. Output Parameters (Tablet Attributes)

a. Tablet Weight

- Most fundamental parameter

- USP limits: $\pm 5-10\%$ (depends on weight category)
 - Measured: every 15-30 min during production
 - Minimum n=20 tablets per check
- b. Hardness (Crushing Strength)
- Resistance to diametral compression until fracture
 - Units: Newtons (N) or kiloponds (kp), 1 kp \approx 10 N
 - Typical range: 40-200 N
 - Measurement: hardness tester (Schleuniger, Erweka, etc.)
 - Specification: typically 60-120 N untuk conventional tablets

Formula (Tensile Strength):

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi Dt}$$

Di mana:

- σ_t = tensile strength (MPa)
- F = fracture force (N)
- D = tablet diameter (mm)
- t = tablet thickness (mm)

Tensile strength more reliable than hardness untuk compare different size/shape tablets.

c. Thickness

- Controlled by compression force dan punch penetration
- Typical tolerance: $\pm 5\%$
- Affects: disintegration, dissolution, appearance

d. Friability

- Resistance terhadap abrasi dan shock
- Measured: Roche friabilator (100 rotations, 25 RPM, 4 min)
- Acceptance: $< 1\%$ weight loss (USP)

- Formula: $\text{Friability (\%)} = \frac{W_{\text{initial}} - W_{\text{final}}}{W_{\text{initial}}} \times 100\%$

e. Disintegration Time

- Time untuk tablet breakdown dalam aqueous medium
 - USP apparatus: basket-rack assembly, 37°C
 - Specification: typically < 15 min untuk immediate-release
 - Affected by: hardness, disintegrant type/amount, porosity
- f. Dissolution
- Rate API dissolved dalam dissolution medium
 - USP apparatus: paddle (Apparatus 2) most common
 - Specification: Q (% dissolved) at specified timepoints
 - Example: > 80% in 30 min
- g. Content Uniformity
- Ensures each tablet contains correct API amount
 - USP <905>: acceptance value (AV) ≤ 15
 - Typically tested: 10-30 tablets per batch

3. In-Process Monitoring

Modern tablet presses equipped dengan:

Force Monitoring:

- Compression force sensors pada upper/lower punches
- Real-time display dan trending
- Alerts jika out-of-spec

Weight Control:

- In-line checkweighers
- Automatic adjustment feedback loop
- Rejects underweight/overweight tablets

Thickness Monitoring:

- Non-contact sensors (laser, ultrasonic)
- Continuous measurement

Vision Systems:

- Camera inspects setiap tablet
- Detects: chips, cracks, color variation, embossing quality
- Automatic rejection

E. DEFEK TABLET: TROUBLESHOOTING GUIDE

1. Capping dan Lamination

Definition:

- Capping: top atau bottom cap separates
- Lamination: horizontal crack atau split

Root Causes:

- Excessive elastic recovery ($> 10\%$)
- Entrapped air tidak removed
- Insufficient bonding
- Too high compression force (paradoxical)
- Tapered die boring

Solutions:

- Add/increase pre-compression
- Reduce compression speed (increase dwell time)
- Increase binder content
- Replace punches (check for wear)
- Use deep concave punches (reduces tensile stress)
- Optimize granulation process

2. Sticking dan Picking

Sticking: powder adheres ke punch face Picking: material pulled out dari tablet surface (embossing areas)

Root Causes:

- Insufficient or ineffective lubrication
- Moisture content too high
- Punch surface rough atau corroded
- API characteristics (hygroscopic, amorphous)

Solutions:

- Increase lubricant level (0.5-1.5%)
- Change lubricant type (Mg stearate, SSF, sodium stearyl fumarate)

- Polish atau re-chrome punch faces
- Control humidity (< 50% RH)
- Add glidant (talc, colloidal SiO₂)

3. Chipping dan Cracking

Definition: small fragments break dari tablet edges

Root Causes:

- Inadequate hardness
- Brittle formulation
- Sharp edges (flat-faced punches)
- High ejection force
- Rough handling post-compression

Solutions:

- Use shallow concave punches (eliminates sharp edges)
- Increase compression force (within limits)
- Add plastic binder (MCC, PVP)
- Reduce ejection force (improve lubrication)
- Install dedusting system

4. Mottling

Definition: uneven color distribution (blotchy appearance)

Root Causes:

- Incomplete mixing
- Migration during granulation/drying
- Dye/pigment agglomeration
- Polymorphic transition

Solutions:

- Improve mixing (longer time, different equipment)
- Use lake colors instead of water-soluble dyes
- Control drying temperature
- Add hydrophilic polymer untuk prevent migration

5. Weight Variation

Root Causes:

- Poor powder flow
- Segregation
- Inconsistent fill depth
- Feed frame issues

Solutions:

- Improve flowability (granulation, glidants)
- Prevent segregation (reduce fines, control particle size)
- Calibrate fill depth control
- Check feed frame speed

F. STUDI KASUS INDUSTRI: SCALE-UP TABLET METFORMIN HCl 500 mg

1. Background:

Metformin HCl adalah first-line therapy untuk diabetes type 2. Typical dose 500-1000 mg. Challenge: high dose (need large tablet), API relatively brittle, hygroscopic.

2. Formulation (Direct Compression):

Ingredient	Amount (mg/tablet)	Function
Metformin HCl	500	API
MCC (Avicel PH102)	150	Binder/Filler
Povidone K30	20	Binder
Croscarmellose sodium	15	Disintegrant
Magnesium stearate	5	Lubricant
Total	690 mg	

3. Lab Scale (Single-punch Press):

- Compression force: 15 kN
- Dwell time: ~1000 ms (slow compression)
- Tablet hardness: 120 N
- Friability: 0.4%
- Disintegration: 8 min
- Result: Acceptable

4. Scale-Up Challenges (Rotary Press):

Challenge 1: Reduced Dwell Time

- Rotary press: 20-40 ms (vs 1000 ms lab)
- Result: hardness dropped to 80 N
- Solution: Increased compression force to 22 kN → hardness 115 N (acceptable)

Challenge 2: Weight Variation

- Lab: RSD 1.2%
- Production: RSD 3.8% (out-of-spec)
- Root cause: Poor flow at high speed
- Solution:
 - Increased MCC grade (PH102 → PH200, better flow)
 - Added colloidal silicon dioxide (0.5% as glidant)
 - Optimized feed frame speed
 - Result: RSD improved to 1.9%

Challenge 3: Capping Issues

- Occasional capping (2-3% defect rate)
- Root cause: Air entrapment at high speed
- Solution:
 - Implemented pre-compression stage (force: 5 kN)
 - Result: capping eliminated (< 0.1% defect rate)

Challenge 4: Sticking on Embossing

- Tablet embossed with "M500"

- Sticking observed after 2 hours production
- Root cause: Metformin hygroscopicity + embossing depth
- Solution:
 - Increased Mg stearate to 0.8% (from 0.7%)
 - Applied chrome plating pada punch tips
 - Controlled production area RH < 40%
 - Reduced embossing depth by 0.2 mm
 - Result: No sticking for 8-hour production run

5. Final Production Parameters:

- Machine: Fette 3090i (37 stations)
- Turret speed: 50 RPM
- Pre-compression: 5 kN
- Main compression: 22 kN
- Output: 111,000 tablets/hr
- Tablet specifications: ALL IN-SPEC
 - Weight: 690 ± 21 mg (RSD 1.9%)
 - Hardness: 115 ± 8 N
 - Friability: 0.5%
 - Disintegration: 9 min
 - Dissolution: > 80% in 30 min

6. Lessons Learned:

1. Dwell time compensation critical untuk scale-up
2. Flow properties paramount pada high-speed production
3. Pre-compression effective untuk air-sensitive formulations
4. Environmental control (RH) crucial untuk hygroscopic APIs
5. Punch surface treatment reduces sticking propensity

G. EMERGING TECHNOLOGIES DAN FUTURE TRENDS

1. AI dan Machine Learning dalam Tablet Compression

Menurut Bounab et al. (2025), artificial intelligence telah merevolusi tablet compression dengan multi-task framework yang menggabungkan regression, classification, dan text generation untuk:

- Prediksi tablet properties: friability, hardness, disintegration time, water absorption ratio
- Batch acceptance determination: real-time quality decision
- Causal analysis: understanding why tablets fail specifications
- Achievement: 91.8% R^2 untuk regression, 95.5% accuracy untuk classification

Applications:

- Real-time quality control tanpa destructive testing
- Predictive maintenance (prediksi punch wear)
- Process optimization (automatic parameter adjustment)
- Reduced development time dan material waste

2. Continuous Manufacturing

Shift dari batch ke continuous manufacturing:

- Integrated process: blending → compression → coating in-line
- Real-time release testing (RTRT)
- Reduced footprint dan inventory
- Better process control (smaller variations)
- Regulatory support (FDA encouragement)

3. Advanced Process Control (PAC)

- Multivariate statistical process control (MSPC)
- Principal component analysis (PCA) untuk detect deviations
- Automatic feedback loops

- Integration dengan MES (Manufacturing Execution Systems)

4. 3D Printing Tablets

- Personalized dosing
- Complex release profiles
- Multi-API tablets dengan different release kinetics
- On-demand manufacturing
- Still limited commercial adoption (regulatory, scalability challenges)

5. Industry 4.0 Integration

- IoT sensors pada setiap press
- Cloud-based data analytics
- Digital twin untuk virtual optimization
- Augmented reality (AR) untuk operator training dan troubleshooting

H. VALIDASI PROSES KOMPRESI (FDA/ICH Guidelines)

1. Process Validation Life Cycle (ICH Q8, Q9, Q10)

Stage 1: Process Design

- Define QTPP (Quality Target Product Profile)
- Identify CQAs (Critical Quality Attributes): hardness, dissolution, content uniformity
- Identify CPPs (Critical Process Parameters): compression force, speed, dwell time
- Design space development (DoE)

Stage 2: Process Qualification

IQ (Installation Qualification):

- Verify equipment installed correctly
- Check utilities (compressed air, electrical)
- Document all specifications

OQ (Operational Qualification):

- Test all functions: turret rotation, force application, weight control
- Verify alarms dan safety interlocks

- Calibrate force transducers, sensors

PQ (Performance Qualification):

- Demonstrate process capability
- Run 3 validation batches (minimum)
- Prove all CQAs within specification
- Statistical analysis ($C_{pk} > 1.33$)

Stage 3: Continued Process Verification

- Ongoing monitoring dengan control charts
- Investigate out-of-trend (OOT) dan out-of-specification (OOS)
- Periodic re-qualification (annual atau after major changes)

2. Critical Quality Attributes (CQAs) Monitoring

CQA Acceptance Criteria:

CQA	Specification	Cpk Target
Weight	$\pm 5\%$	> 1.67
Hardness	80-140 N	> 1.33
Friability	$< 1.0\%$	> 1.33
Disintegration	< 15 min	> 1.33
Dissolution	$> 80\%$ (30 min)	> 1.33

Process Capability Index:

$$C_{pk} = \min \left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right)$$

Di mana:

- USL = upper specification limit
- LSL = lower specification limit
- μ = process mean
- σ = process standard deviation

$C_{pk} > 1.33$ indicates capable process (< 64 defects per million).

Daftar Pustaka

1. Lou, H., Hu, G., Luan, X., Steinbach-Rankins, J. M., & Hageman, M. J. (2025). Application of a UV-vis spectrometer to investigate the effect of dissolution media on the diffusivity of small molecules and proteins. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 114(1), 256-264. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2024.09.008>
2. Singhal, A., Saini, U., Chopra, B., Dhingra, K. A., Jain, A., & Chaudhary, J. (2024). UV-Visible Spectroscopy: A Review on its Pharmaceutical and Bio-allied Sciences Applications. *Current Pharmaceutical Analysis*, 20(3), 161-177. <https://doi.org/10.2174/0115734129300562240408042614>
3. Arif, M., Raza, H., & Akhter, T. (2024). UV-Vis spectroscopy in the characterization and applications of smart microgels and metal nanoparticle-decorated smart microgels: a critical review. *RSC Advances*, 14(51), 38120-38134. <https://doi.org/10.1039/d4ra07643e>
4. MarketsandMarkets (2024). UV/Visible Spectroscopy Market - Global Forecast to 2029. Retrieved from <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/uv-visible-spectroscopy-market-243898303.html>
5. Archive Market Research (2025). In-line UV-Vis Spectroscopy Market: Trends and Forecasts 2025-2033. Retrieved from <https://www.archivemarketresearch.com/reports/in-line-uv-vis-spectroscopy-328861>
6. Technology Networks (2023). UV-Vis Spectroscopy: Principle, Strengths and Limitations and Applications. Retrieved from <https://www.technologynetworks.com/analysis/articles/uv-vis-spectroscopy-principle-strengths-and-limitations-and-applications-349865>
7. JASCO (2023). Instrumentation of a UV-Visible Spectrophotometer. Retrieved from <https://jascoinc.com/learning-center/theory/spectroscopy/uv-vis-spectroscopy/instrumentation/>

8. Bounab, Y., Antikainen, O., Sivén, M., & Juppo, A. (2025). Advancing Direct Tablet Compression with AI: A multi-task framework for quality control, batch acceptance, and causal analysis. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 212, 107142. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2025.107142>
9. Bahr, M. N. (2025). A Design of Experiments for Tablet Compression. *Pharmaceutical Technology*, reprint from 2011, accessed 2025. Retrieved from <https://www.pharmtech.com/view/design-experiments-tablet-compression>
10. Wagh, R. D., Kothawade, P. D., & Salunke, P. H. (2023). An update on advancements in tablet tooling technology. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 81, 104436. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104436>
11. Djuriš, J., et al. (2024). Evaluation of the Potential of Novel Co-Processed Excipients to Enable Direct Compression and Modified Release of Ibuprofen. *Pharmaceutics*, 16(11), 1473. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16111473>
12. GM Insights (2024). Tablet Press Machines Market Size & Growth Outlook 2025-2034. Market valued at USD 2.47B in 2025, projected USD 4.68B by 2033, CAGR 8.3%. Retrieved from <https://www.gminsights.com/industry-analysis/tablet-press-machines-market>
13. Archive Market Research (2025). Tablet Compression Tooling Market: Charting Growth Trajectories 2025-2033. Projected to reach \$323M in 2025, CAGR 3.4%. Retrieved from <https://www.archivemarketresearch.com/reports/tablet-compression-tooling-178420>
14. Pharmaceutical Technology (2025). Improving Tablet Quality with Compression to Equal Force Technology. Retrieved from <https://www.pharmtech.com/view/improving-tablet-quality-compression-equal-force-technology>

15. PharmaState Academy (2022). Tablet Compression: Machine Design. Technical guide. Retrieved from <https://pharmastate.academy/tablet-compression-machine-design/>
16. SNS Insider (2025). Inline Viscosity Sensor Market Size to Surpass USD 253.65 Million by 2033. Market valued at USD 102.8M in 2025, CAGR 5.92%. Retrieved from <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/11/24/3193373/0/en/>
17. Anton Paar GmbH (2025). Pharmaceutical Compliance in the Fields of Viscometry and Rheometry. Technical guide on 21 CFR Part 11 compliance and GMP standards. Retrieved from <https://www.anton-paar.com/corp-en/viscometry-rheometry/pharmaceutical-compliance/>
18. Brookfield Engineering (2023-2024). Operating Instructions Manuals for DV-E, DV1, and DVE Viscometers. Retrieved from <https://www.brookfieldengineering.com>
- 19.



PEMBELAJARAN FARMASI FISIKA BERBASIS STIL

KONSEP DASAR FISIKA UNTUK TEKNOLOGI FARMASI

MEIRY AKMARA DHINA, M.PD. - PROF. DR. IDA KANIAWATI, M.SI.
PROF. DR. ADE GAFAR ABDULLAH, M.SI. - PROF. DR. LILIK HASANAH, M.SI.
APT. SRI MARYAM, M.SI.