

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

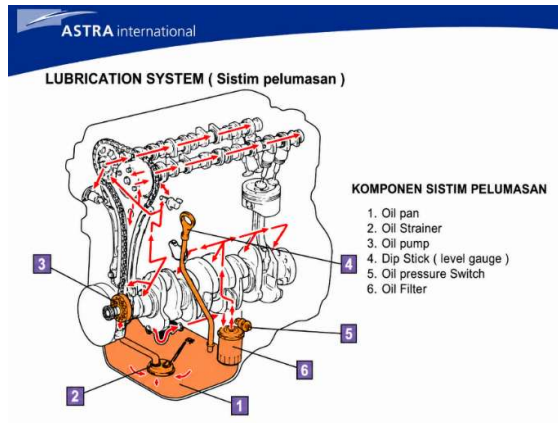
2.1 Landasan Teori

Landasan teori pada penelitian ini berisi konsep dan teori yang mendukung analisis mengenai kinerja filter oli, khususnya terkait sistem pelumasan dan penurunan tekanan (*pressure drop*). Teori-teori tersebut digunakan sebagai dasar dalam memahami pengaruh jenis media filter dan kondisi pengujian terhadap karakteristik aliran fluida pada filter oli.

2.1.1 Sistem Pelumasan

Sistem pelumasan merupakan sistem yang berfungsi untuk mengurangi gesekan, mendinginkan, membersihkan, serta melindungi komponen mesin dari keausan dan korosi. Pelumasan yang baik akan meningkatkan efisiensi kerja mesin dan memperpanjang umur komponen mesin. Oli yang bersirkulasi di dalam sistem pelumasan harus tetap dalam kondisi bersih agar tidak menyebabkan keausan akibat kontaminan maupun partikel logam hasil gesekan komponen mesin (George E. Totten, 2006)

Pada mesin kendaraan roda empat, sistem pelumasan umumnya menggunakan tipe *pressure feed lubrication system*, di mana oli dipompa dari bak oli (*oil pan*) menggunakan pompa oli menuju saluran pelumasan mesin. Oli kemudian dialirkan menuju komponen-komponen seperti bantalan poros engkol (*main bearing*), poros nok (*camshaft*), piston, dan *valve train* sebelum kembali ke bak oli. Sebelum oli bersirkulasi kembali, oli terlebih dahulu melewati filter oli untuk menyaring partikel kotoran, *sludge*, dan serpihan logam agar kualitas pelumasan tetap terjaga. kualitas pelumasan dipengaruhi oleh kemampuan oli dalam mempertahankan lapisan film pelumas serta kebersihan oli selama bersirkulasi di dalam sistem. Oleh karena itu, filter oli dengan media filtrasi yang baik sangat diperlukan untuk menjaga kualitas oli dan mencegah kerusakan komponen mesin akibat kontaminan (George E. Totten, 2006).



Gambar 2. 1 Sistem Pelumasan
<https://anyflip.com/ykzue/fhdj/basic>

Komponen utama sistem pelumasan terdiri dari:

1. Bak oli (*oil pan*)
2. Pompa oli (*oil pump*)
3. Katup pengatur tekanan (*relief valve*)
4. Filter oli (*oil filter*)
5. *Level Gauge*
6. *Pressure switch* dan *pressure gauge*

Filter oli memiliki peranan penting dalam menjaga kebersihan oli selama proses sirkulasi. Media filter yang digunakan akan mempengaruhi kemampuan penyaringan, kapasitas penahanan kontaminan, serta penurunan tekanan (*pressure drop*) pada sistem pelumasan. Oleh karena itu, pemilihan media filter menjadi faktor penting dalam menjaga performa sistem pelumasan mesin (Tian et al., 2024).

Filter oli merupakan salah satu komponen utama dalam sistem pelumasan yang berfungsi untuk menjaga kebersihan oli dengan cara menyaring partikel kontaminan yang terbawa dalam aliran fluida. Kontaminan tersebut dapat berupa debu, partikel logam hasil keausan komponen, serta residu pembakaran yang terbentuk selama proses kerja mesin. Keberadaan kontaminan dalam oli dapat mempercepat keausan komponen dan menurunkan efektivitas pelumasan, sehingga diperlukan sistem filtrasi yang baik (Kamiński et al., 2022)

Filter oli bekerja dengan cara mengalirkan oli melalui media penyaring berpori (*porous media*). Ketika oli melewati media filter, partikel kontaminan akan

tertahan pada permukaan maupun di dalam struktur pori media filter, sedangkan oli yang telah tersaring akan diteruskan kembali ke sistem pelumasan. Proses filtrasi tersebut berlangsung secara kontinu selama sistem pelumasan beroperasi dan dapat menyebabkan peningkatan *pressure drop* akibat akumulasi partikel pada media filter (Chen et al., 2025).

Filter oli biasanya terdiri dari beberapa bagian utama, antara lain rumah filter (*housing*), elemen filter (*filter element*), katup *bypass*, dan katup *anti-drainback*. Elemen filter merupakan bagian utama yang berfungsi sebagai media penyaring, sedangkan katup *bypass* berfungsi untuk menjaga aliran oli tetap berlangsung ketika filter mengalami penyumbatan. Katup *anti-drainback* berfungsi untuk mencegah oli kembali ke bak penampungan saat mesin dimatikan.



Gambar 2. 2 Filter Oli

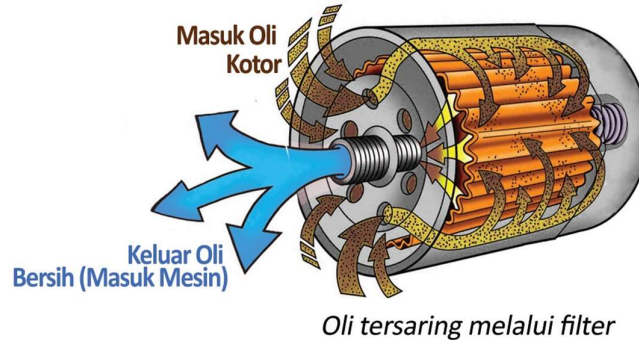
Dalam operasinya, filter oli harus mampu menjaga keseimbangan antara kemampuan menyaring kontaminan dan kelancaran aliran fluida. Jika filter terlalu rapat, maka aliran oli dapat terhambat, sedangkan jika terlalu longgar, maka kontaminan dapat lolos dan menyebabkan kerusakan pada komponen mesin. Oleh karena itu, kinerja filter oli sangat berpengaruh terhadap keandalan sistem pelumasan dan umur pakai mesin secara keseluruhan.

2.1.2 Prinsip Kerja Filter Oli

Filter oli bekerja berdasarkan prinsip dasar filtrasi, yaitu pemisahan partikel padat dari fluida dengan menggunakan media berpori. Dalam sistem pelumasan, oli yang mengandung kontaminan dialirkan melalui media filter, sehingga partikel kotoran akan tertahan pada permukaan maupun di dalam struktur media filter,

sedangkan oli bersih akan diteruskan kembali ke sistem pelumasan.

Prinsip kerja filter oli dimulai dari pompa oli yang mengalirkan fluida menuju filter. Oli kemudian melewati media filter yang memiliki pori-pori tertentu, sehingga partikel dengan ukuran lebih besar dari pori akan tertahan, sementara fluida bersih dapat melewati media tersebut. Proses ini bertujuan untuk menjaga kebersihan oli dan melindungi komponen mesin dari keausan akibat kontaminan.



Gambar 2. 3 Prinsip Kerja Filter Oli

(<https://www.autofun.co.id/berita-motor/bukan-cuma-mobil-motor-juga-ada-filter-oli-yang-perlu-diganti-lho-44887>)

Mekanisme filtrasi pada filter oli tidak hanya bergantung pada penyaringan secara mekanis, tetapi juga melibatkan beberapa mekanisme lain seperti *interception*, *impaction*, dan *diffusion*, tergantung pada ukuran partikel dan karakteristik aliran fluida. Partikel besar umumnya tertangkap melalui mekanisme penyaringan langsung, sedangkan partikel yang lebih kecil dapat tertahan melalui interaksi dengan serat media filter.

Proses filtrasi berlangsung, partikel kontaminan akan terakumulasi pada permukaan media filter dan membentuk lapisan yang disebut sebagai *cake layer*. Lapisan ini dapat meningkatkan efisiensi penyaringan, namun juga menyebabkan peningkatan hambatan aliran yang berdampak pada kenaikan *pressure drop* (Tian *et al.*, 2024).

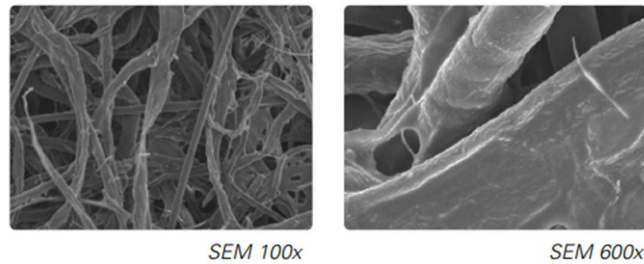
Prinsip kerja filter oli juga dipengaruhi oleh karakteristik material media filter, seperti porositas, ukuran pori, dan sifat permukaan. Media filter dengan struktur tertentu mampu meningkatkan kapasitas penahanan partikel sekaligus menjaga kestabilan aliran fluida. Namun, jika akumulasi kontaminan terlalu tinggi, maka resistansi aliran akan meningkat secara signifikan dan dapat menurunkan

kinerja sistem pelumasan (Li et al., 2025).

Prinsip kerja filter oli tidak hanya berfungsi sebagai penyaring, tetapi juga sebagai sistem yang mengatur keseimbangan antara efisiensi filtrasi dan kelancaran aliran fluida dalam sistem pelumasan.

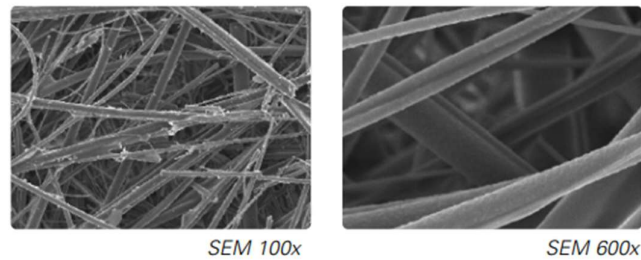
2.1.3 Jenis Material Filter Oli

Material media filter merupakan komponen utama yang menentukan kinerja filter oli dalam menyaring kontaminan serta mempengaruhi karakteristik aliran fluida. Berdasarkan penelitian terbaru, material filter oli umumnya terdiri dari beberapa jenis utama, yaitu selulosa, sintetis (seperti serat kaca atau polimer), serta material campuran yang menggabungkan keduanya (Rojas-Reinoso et al., 2025).



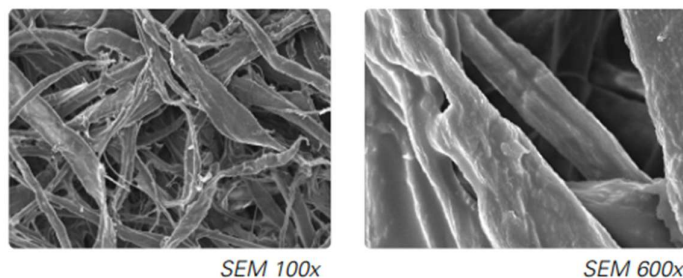
Gambar 2. 4 Filter Selulosa
(America Engine Marketing, n.d.)

Filter berbahan selulosa merupakan jenis yang paling banyak digunakan dalam sistem pelumasan karena biaya produksinya relatif rendah dan mudah diproduksi. Material ini terbuat dari serat alami yang memiliki kemampuan menyerap dan menangkap partikel kontaminan dalam ukuran tertentu. Namun, keterbatasan utama dari filter selulosa adalah struktur porinya yang tidak seragam serta ketahanan yang lebih rendah terhadap kondisi operasi ekstrem, sehingga efisiensi filtrasi terhadap partikel halus menjadi terbatas (Abeens et al., 2023).



Gambar 2. 5 Filter Sintetis
(Donaldson Company, 2021)

Filter berbahan sintetis, seperti serat kaca (*glass fiber*) atau polimer, memiliki struktur yang lebih seragam dan ukuran pori yang lebih terkontrol dibandingkan dengan selulosa. Hal ini menyebabkan filter sintetis memiliki efisiensi filtrasi yang lebih tinggi serta kapasitas penahanan kontaminan yang lebih besar. Selain itu, material sintetis juga memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap suhu dan kondisi operasi yang berat, sehingga mampu mempertahankan performa dalam jangka waktu yang lebih lama (Li et al., 2025).



Gambar 2. 6 Filter Campuran
(Donaldson Company, 2021)

Filter campuran (*composite/blend*) merupakan kombinasi antara material selulosa dan sintetis yang dirancang untuk mengoptimalkan keunggulan masing-masing material. Material campuran ini mampu meningkatkan efisiensi penyaringan sekaligus menjaga karakteristik aliran fluida tetap stabil. Penggunaan kombinasi serat alami dan sintetis juga dapat meningkatkan daya tahan filter serta mengurangi kenaikan tekanan diferensial selama proses filtrasi (Rojas-Reinoso et al., 2025).

Perkembangan teknologi filtrasi juga mengarah pada penggunaan material baru seperti serat nano dan material komposit berbasis polimer yang bertujuan

untuk meningkatkan efisiensi filtrasi dan mengurangi *pressure drop*. Struktur material yang lebih halus dan terkontrol memungkinkan peningkatan kemampuan penangkapan partikel tanpa meningkatkan hambatan aliran secara signifikan (Abeens et al., 2023).

Pemilihan jenis material filter oli sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem pelumasan, khususnya dalam menentukan efisiensi penyaringan, kapasitas penahanan kontaminan, serta karakteristik penurunan tekanan (*pressure drop*). Oleh karena itu, analisis terhadap berbagai jenis material filter menjadi penting untuk menentukan filter yang paling optimal sesuai dengan kondisi operasi.

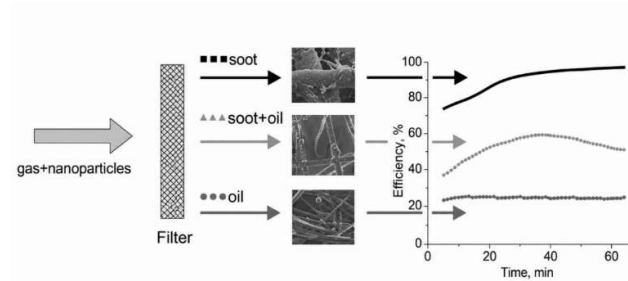
2.1.4 Kontaminan Partikel Padat

Kontaminan partikel padat (*solid particles*) merupakan jenis kontaminan utama yang terdapat dalam sistem pelumasan dan menjadi target utama dari proses filtrasi pada filter oli. Partikel ini dapat berasal dari berbagai sumber, seperti keausan komponen mesin, kontaminasi dari lingkungan luar, serta residu hasil pembakaran. Keberadaan partikel padat dalam oli dapat menyebabkan peningkatan keausan komponen, penurunan efisiensi pelumasan, serta gangguan pada kinerja sistem secara keseluruhan (Kamiński et al., 2022).

Partikel padat dalam oli umumnya terdiri dari berbagai jenis material, antara lain logam (seperti besi, aluminium, dan tembaga) yang berasal dari keausan komponen, debu atau partikel silika dari lingkungan, serta partikel karbon (*soot*) yang dihasilkan dari proses pembakaran. Setiap jenis partikel memiliki karakteristik yang berbeda, baik dari segi ukuran, bentuk, maupun sifat fisik, yang mempengaruhi proses filtrasi dan interaksinya dengan media filter (Zhang et al., 2023).

Ukuran partikel padat dalam sistem pelumasan sangat bervariasi dan menjadi faktor penting dalam menentukan efektivitas filtrasi. Berdasarkan penelitian dan standar analisis oli, ukuran partikel umumnya diklasifikasikan sebagai berikut:

- < 5 μm → partikel sangat halus (sulit difilter, sangat berbahaya)
- 5 – 15 μm → partikel halus (menyebabkan keausan awal)
- 15 – 50 μm → partikel sedang
- 50 μm → partikel kasar (lebih mudah difilter)



Gambar 2. 7 Grafik Kontaminan
(Kamiński et al., 2022)

Penelitian menunjukkan bahwa partikel dengan ukuran sekitar $\geq 10 \mu\text{m}$ sudah dapat menyebabkan keausan signifikan pada komponen mesin, sehingga perlu dikendalikan melalui sistem filtrasi yang efektif (Zhang et al., 2023). Selain itu, partikel hasil pembakaran seperti *soot* dapat memiliki ukuran yang sangat kecil, yaitu kurang dari $1 \mu\text{m}$, sehingga sulit ditangkap oleh filter konvensional (Kamiński et al., 2022).

Dalam proses filtrasi, partikel padat akan tertahan pada media filter melalui mekanisme penyaringan, penempelan pada serat, serta pengendapan dalam struktur pori media. Seiring waktu, akumulasi partikel akan membentuk lapisan pada permukaan filter (*cake layer*) yang menyebabkan peningkatan resistansi aliran fluida. Hal ini berdampak pada meningkatnya nilai penurunan tekanan (*pressure drop*) selama proses operasi (Cui et al., 2026).

Karakteristik partikel padat, baik dari segi jenis maupun ukuran, memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja filter oli. Dalam penelitian ini, kontaminan yang digunakan difokuskan pada partikel padat dengan variasi ukuran tertentu untuk menganalisis pengaruhnya terhadap penurunan tekanan pada berbagai jenis media filter oli.

2.1.5 Debit

Debit aliran fluida merupakan besaran yang menunjukkan jumlah volume fluida yang mengalir melalui suatu penampang dalam satuan waktu tertentu. Debit aliran menjadi salah satu parameter penting dalam analisis sistem perpipaan karena mempengaruhi kecepatan aliran, tekanan fluida, serta kehilangan energi (*head losses*) pada sistem aliran fluida (Jalaluddin et al., 2019).

Pada sistem aliran fluida dalam pipa, debit aliran dapat dinyatakan sebagai volume fluida yang melewati suatu penampang setiap satuan waktu. Debit aliran umumnya dinyatakan dalam satuan m^3/s atau L/min . Semakin besar debit aliran, maka jumlah fluida yang mengalir dalam sistem perpipaan juga akan semakin besar. Persamaan debit aliran ditunjukkan sebagai berikut :

$$Q = \frac{V}{t} \quad 2-1$$

Keterangan :

Q = debit aliran fluida (m^3/s)

V = volume fluida (m^3)

t = waktu aliran (s)

2.1.6 Luas Penampang Pipa

Luas penampang pipa merupakan parameter yang digunakan untuk menentukan besar area aliran fluida di dalam sistem perpipaan. Luas penampang memiliki pengaruh terhadap kecepatan aliran fluida, debit aliran, serta karakteristik aliran pada sistem perpipaan (Fox et al., 2021).

Pada aliran fluida di dalam pipa, luas penampang berhubungan langsung dengan debit dan kecepatan aliran melalui persamaan kontinuitas. Semakin kecil luas penampang pipa, maka kecepatan aliran fluida akan semakin besar (Cengel & Cimbala, 2013) tetap (Cengel & Cimbala, 2013). Untuk pipa berbentuk lingkaran, luas penampang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad 2-2$$

Keterangan :

A = luas penampang pipa (m^2)

D = diameter dalam pipa (m)

π = konstanta pi (3.14)

2.1.7 Kecepatan Aliran Pipa

Kecepatan aliran fluida merupakan besaran yang menunjukkan laju perpindahan fluida dalam suatu sistem aliran per satuan waktu. Kecepatan aliran menjadi salah satu parameter penting dalam analisis mekanika fluida karena mempengaruhi karakteristik aliran, bilangan *Reynolds*, *head losses*, dan *pressure*

drop pada sistem perpipaan (Fox et al., 2021).

Pada sistem aliran fluida di dalam pipa, kecepatan aliran dipengaruhi oleh debit aliran dan luas penampang pipa. Semakin besar debit aliran fluida, maka kecepatan aliran akan semakin meningkat. Sebaliknya, semakin besar luas penampang pipa, maka kecepatan aliran fluida akan semakin kecil apabila debit aliran tetap (Cengel & Cimbala, 2013). Kecepatan aliran fluida dapat dihitung menggunakan persamaan kontinuitas sebagai berikut:

$$v = \frac{Q}{A} \quad 2-3$$

Keterangan :

v = kecepatan aliran fluida (m/s)

Q = debit aliran fluida (m^3/s)

A = luas penampang pipa (m^2)

2.1.8 Bilangan *Reynolds*

Bilangan *Reynolds* merupakan bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk menentukan jenis aliran fluida pada sistem perpipaan, apakah termasuk aliran laminar, transisi, atau turbulen. Bilangan *Reynolds* menunjukkan perbandingan antara gaya inersia fluida terhadap gaya viskositas fluida selama proses aliran berlangsung (Fox et al., 2021).

Persamaan bilangan *Reynolds* ditunjukkan sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad 2-4$$

Keterangan :

Re = bilangan *Reynolds*

ρ = densitas fluida (kg/m^3)

v = kecepatan aliran fluida (m/s)

D = diameter dalam pipa (m)

μ = viskositas dinamis fluida ($Pa.s$)

Tabel 2. 1 Tabel Bilangan *Reynolds*

Bilangan <i>Reynolds</i>	Jenis Aliran
($Re < 2300$)	Laminar
($2300 < Re < 4000$)	Transisi
($Re > 4000$)	Turbulen

2.1.9 Faktor Gesek Pipa

Faktor gesek pipa (*friction factor*) merupakan parameter yang digunakan untuk menunjukkan besarnya hambatan aliran akibat gesekan antara fluida dan permukaan dinding bagian dalam pipa. Nilai faktor gesek dipengaruhi oleh jenis aliran fluida, kekasaran permukaan pipa, serta bilangan *Reynolds* pada sistem aliran fluida (Fox et al., 2021).

Faktor gesek digunakan pada persamaan *Darcy–Weisbach* untuk menghitung kehilangan energi (*head losses*) akibat gesekan sepanjang pipa. Semakin besar nilai faktor gesek, maka kehilangan energi aliran fluida juga akan semakin besar (Cengel & Cimbala, 2013).

Pada kondisi aliran transisi dan turbulen, nilai faktor gesek dipengaruhi oleh kekasaran permukaan pipa (*pipe roughness*) sehingga penentuan faktor gesek dapat dilakukan menggunakan *Moody Diagram*. *Moody Diagram* menunjukkan hubungan antara *Bilangan Reynolds*, kekasaran relatif pipa, dan faktor gesek aliran di dalam pipa (Moody, 2022). Kekasaran relatif pipa dinyatakan menggunakan persamaan :

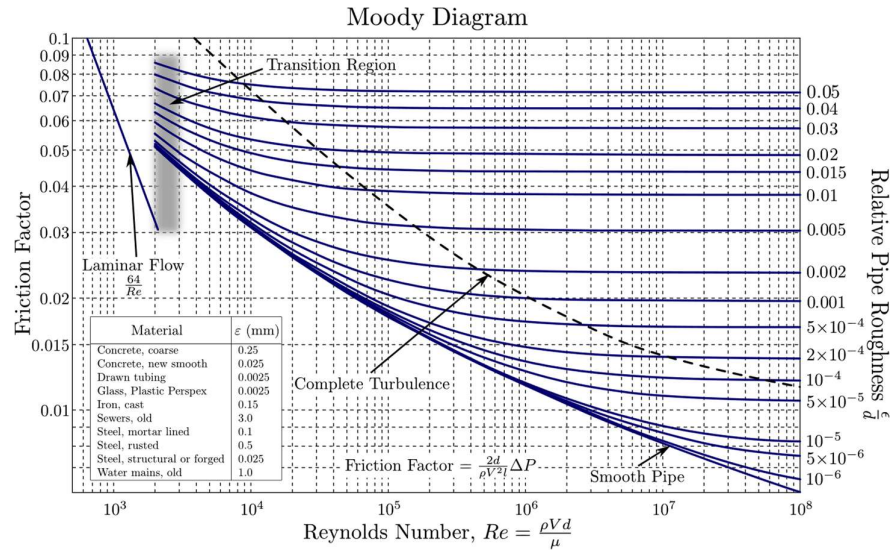
$$\frac{\epsilon}{D} \quad 2-5$$

Keterangan :

ϵ = kekasaran absolut permukaan pipa

D = diameter dalam pipa

Pada penelitian ini digunakan pipa galvanis sehingga faktor gesek aliran ditentukan menggunakan pendekatan diagram *Moody* dengan mempertimbangkan kekasaran permukaan pipa galvanis dan bilangan *Reynolds* hasil perhitungan aliran fluida.



Gambar 2. 8 Diagram *Moody*
(Moody, 2022)

Diagram *Moody* banyak digunakan pada analisis sistem perpipaan karena mampu memberikan pendekatan faktor gesek yang lebih realistis pada kondisi aliran transisi maupun turbulen dibandingkan pendekatan aliran laminar sederhana (White, 2016).

2.1.10 Head Losses

Head losses merupakan kehilangan energi fluida yang terjadi selama proses aliran dalam sistem perpipaan akibat gesekan fluida dengan dinding pipa maupun komponen perpipaan lainnya. Kehilangan energi tersebut menyebabkan tekanan fluida menurun sepanjang jalur aliran. Dalam sistem aliran fluida, *head losses* menjadi salah satu parameter penting karena mempengaruhi performa aliran dan nilai *pressure drop* pada sistem perpipaan (Fox et al., 2021).

Head losses dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *major losses* dan *minor losses*. *Major losses* terjadi akibat gesekan fluida sepanjang pipa, sedangkan *minor losses* terjadi akibat *fitting* dan komponen perpipaan seperti *elbow*, *tee*, *valve*, sambungan, dan perubahan arah aliran fluida (Cengel & Cimbala, 2013).

1. Major Losses

Major losses merupakan kehilangan energi akibat gesekan antara fluida dan permukaan bagian dalam pipa selama proses aliran berlangsung. Besarnya kehilangan energi dipengaruhi oleh panjang pipa, diameter pipa, kekasaran

permukaan pipa, dan kecepatan aliran fluida. Perhitungan *major losses* dapat dilakukan menggunakan persamaan *Darcy–Weisbach* sebagai berikut :

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad 2-6$$

Keterangan :

h_f = major losses (m)

f = faktor gesek pipa

L = panjang pipa (m)

D = diameter pipa (m)

v = kecepatan aliran fluida (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

2. Minor Losses

Minor losses merupakan kehilangan energi yang terjadi akibat adanya *fitting* dan komponen perpipaan seperti *elbow*, *tee*, *valve*, sambungan, serta perubahan arah aliran fluida. Walaupun disebut *minor losses*, pada sistem perpipaan dengan banyak *fitting* kehilangan energi ini dapat memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap total kehilangan energi fluida. Persamaan *minor losses* ditunjukkan sebagai berikut.

$$h_m = K \frac{v^2}{2g} \quad 2-7$$

Keterangan :

h_m = minor losses (m)

K = koefisien kerugian *fitting*

v = kecepatan aliran fluida (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

Nilai koefisien kerugian (K) bergantung pada jenis *fitting* dan karakteristik aliran fluida dalam sistem perpipaan.

3. Total Head Losses

Total *head losses* merupakan jumlah keseluruhan kehilangan energi akibat *major losses* dan *minor losses* selama proses aliran berlangsung pada sistem perpipaan. Persamaan total *head losses* ditunjukkan sebagai berikut :

$$h_t = h_f + h_m \quad 2-8$$

Keterangan :

h_t = total *head losses* (m)

h_t = major *losses* (m)

h_m = minor *losses* (m)

Analisis *head losses* digunakan untuk mengetahui besarnya kehilangan energi fluida pada sistem pengujian filter oli selama proses sirkulasi berlangsung.

2.1.11 Persamaan *Bernoulli*

Persamaan *Bernoulli* merupakan salah satu persamaan dasar dalam mekanika fluida yang digunakan untuk menjelaskan hubungan antara tekanan, kecepatan aliran, dan energi potensial fluida pada sistem aliran tunak (*steady flow*). Persamaan ini menyatakan bahwa total energi fluida sepanjang garis aliran akan tetap konstan apabila tidak terjadi kehilangan energi akibat gesekan maupun pengaruh luar lainnya (Fox et al., 2021). Persamaan *Bernoulli* ditunjukkan sebagai berikut :

$$P_1 + \frac{1}{2}V_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}V_2^2 + \rho gh_2 + HL \quad 2-9$$

Keterangan :

P = tekanan fluida (Pa)

ρ = densitas fluida (kg/m^3)

V = kecepatan aliran fluida (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

h = elevasi fluida (m)

HL = *Head Losses*

Persamaan *Bernoulli* digunakan sebagai dasar teori untuk menganalisis hubungan antara tekanan dan karakteristik aliran fluida pada sistem pengujian filter oli.

2.1.12 Penurunan Tekanan

Penurunan tekanan (*pressure drop*) merupakan selisih tekanan fluida antara sisi masuk (*inlet*) dan sisi keluar (*outlet*) setelah melewati media filter. Parameter ini menjadi indikator utama dalam mengevaluasi kinerja filter karena mencerminkan besarnya hambatan aliran yang terjadi selama proses filtrasi.

Nilai *pressure drop* yang tinggi menunjukkan adanya resistansi aliran yang besar di dalam media filter. Kondisi ini menyebabkan peningkatan kebutuhan energi untuk mengalirkan fluida serta berpotensi mengganggu distribusi oli dalam

sistem pelumasan, yang pada akhirnya dapat menurunkan performa dan keandalan mesin (Zhou et al., 2026).

Penurunan tekanan pada filter dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, antara lain laju aliran fluida, viskositas, karakteristik media filter, serta kondisi kontaminan. Peningkatan kandungan partikel dalam fluida akan menyebabkan akumulasi partikel pada media filter yang membentuk lapisan (*cake layer*), sehingga meningkatkan resistansi aliran dan menyebabkan kenaikan *pressure drop* secara bertahap selama proses filtrasi (Cui et al., 2026).

Struktur media filter seperti ukuran pori dan porositas juga berperan penting dalam menentukan besarnya penurunan tekanan. Media dengan pori yang lebih kecil cenderung menghasilkan efisiensi filtrasi yang lebih tinggi, namun juga meningkatkan hambatan aliran fluida (Tian et al., 2024).

Karakteristik media filter yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.4 berikut.

Parameters	Filter Medium Identification				
	A	B	C	D	E
Filter medium	Cellulose	Polyester	90% Cellulose +polyester	Cellulose + polyester +nanofibers	Polyester + membrane PTFE
Permeability q_p ($m^3/m^2/h$) at 200 Pa	3015	540	685	540	288
Basis weight g_m (g/m^2)	121	180	135	130	260
Thickness g_z (μm)	610	550	360	300	560

Tabel 2. 2 Tabel Nilai Permeabiliatas
((Dziubak & Dziubak, 2020)

Penurunan tekanan pada media berpori (seperti filter oli) dapat dijelaskan menggunakan persamaan *Darcy's Law*:

$$\Delta P = \frac{\mu L Q}{k A} \quad 2-10$$

Keterangan :

ΔP = penurunan tekanan (Pa)

μ = viskositas fluida (Pa·s)

L = ketebalan media filter (m)

k = permeabilitas media filter (m^2)

Q = debit aliran fluida (m^3/s) (m^3/s)

A = Luas permukaan media filter

Untuk mengonversikan nilai permeabiliatas yang ada di tabel 2.4 diperlukan

modifikasi persamaan *Darcy's Law* sebagai berikut.

$$k = \frac{v\mu L}{\Delta P} \quad 2-11$$

ΔP = tekanan diferensial pengujian (Pa)

μ = viskositas fluida (Pa.s)

L = ketebalan media filter (m)

v = kecepatan aliran fluida (m/s)

k = permeabilitas media filter (m^2)

2.1.13 *Pressure Drop Akibat Lapisan Cake*

Selama proses filtrasi berlangsung, partikel kontaminan yang terbawa oleh fluida akan tertahan pada permukaan media filter dan membentuk lapisan partikel yang disebut sebagai filter *cake*. Akumulasi partikel tersebut menyebabkan bertambahnya hambatan aliran sehingga *pressure drop* pada filter akan meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah kontaminan yang tertahan pada media filter (Haramkar et al., 2021).

Besarnya hambatan yang ditimbulkan oleh lapisan *cake* dipengaruhi oleh karakteristik partikel penyusunnya, seperti ukuran partikel, densitas partikel, porositas lapisan *cake*, dan susunan partikel yang terbentuk selama proses filtrasi (Haramkar et al., 2021). Hambatan lapisan *cake* umumnya direpresentasikan menggunakan parameter *specific cake resistance* (α). Nilai *specific cake resistance* dapat diperkirakan menggunakan persamaan *Kozeny-Carman* sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{180(1-\varepsilon)}{\rho_p d_p^2 \varepsilon^3} \quad 2-12$$

α = *specific cake resistance* (m/kg)

ε = porositas lapisan *cake*

ρ_p = densitas partikel kontaminan (kg/m^3)

d_p = diameter partikel kontaminan (m)

Nilai *specific cake resistance* yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung *pressure drop* akibat lapisan *cake* yang terbentuk pada media filter selama proses filtrasi. *Pressure drop* akibat lapisan *cake* dapat dihitung menggunakan persamaan filtrasi sebagai berikut:

$$\Delta P_{cake} = \frac{\mu Q \alpha W}{A^2} \quad 2-13$$

ΔP_{cake} = pressure drop akibat lapisan *cake* (Pa)

μ = viskositas dinamis fluida (Pa.s)

Q = debit aliran fluida (m³/s)

A = luas efektif media filter (m²)

W = massa kontaminan yang tertahan pada media filter (kg)

α = *specific cake resistance* (m/kg)

Pressure drop total pada filter merupakan penjumlahan antara *pressure drop* media filter bersih dan *pressure drop* akibat lapisan *cake* yang terbentuk selama proses filtrasi. Hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{clean} + \Delta P_{cake} \quad 2-14$$

ΔP_{total} = *pressure drop* total pada filter (Pa)

ΔP_{clean} = *pressure drop* media filter bersih (Pa)

ΔP_{cake} = *pressure drop* akibat lapisan *cake* (Pa)

Nilai *specific cake resistance* dihitung menggunakan pendekatan *Kozeny-Carman* berdasarkan karakteristik partikel pasir silika yang digunakan sebagai kontaminan. Nilai tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung *pressure drop* akibat penyumbatan dan *pressure drop* total pada setiap variasi media filter dan massa kontaminan yang diuji.

2.1.14 Faktor yang Mempengaruhi *Pressure Drop*

Penurunan tekanan pada filter dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu:

1. Laju aliran (*flow rate*)

Semakin tinggi laju aliran fluida, maka semakin besar tekanan yang hilang akibat meningkatnya gaya gesek dalam aliran.

2. Viskositas fluida

Fluida dengan viskositas tinggi memiliki resistansi aliran yang lebih besar sehingga menghasilkan *pressure drop* yang lebih tinggi (Robert W. Fox et al., 2010)

3. Kondisi kontaminan

Kandungan partikel dalam oli dapat menyebabkan penyumbatan pada media filter, sehingga meningkatkan tekanan diferensial.

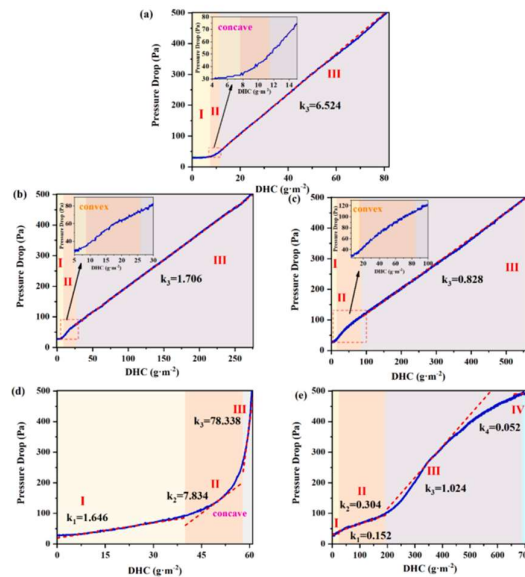
4. Karakteristik media filter

Struktur pori, ketebalan media, dan jenis material filter sangat menentukan resistansi terhadap aliran fluida (Tian et al., 2024)

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai karakteristik media filter dan penurunan tekanan (*pressure drop*) telah banyak dilakukan pada berbagai sistem filtrasi fluida. Berbagai penelitian tersebut menunjukkan bahwa struktur media filter, kondisi aliran fluida, dan tingkat kontaminasi memiliki pengaruh signifikan terhadap performa filtrasi dan hambatan aliran.

Penelitian yang dilakukan oleh Tian et al. (2024) menunjukkan bahwa karakteristik media filter dan akumulasi partikel pada permukaan filter mempengaruhi peningkatan *pressure drop* selama proses filtrasi berlangsung. Semakin besar akumulasi partikel yang tertahan pada media filter, maka hambatan aliran fluida akan semakin meningkat.



Gambar 2. 9 Perkembangan pressure drop pada media filter selama proses penumpukan partikel (*particle loading*) (Tian et al., 2024)

Penelitian oleh Cui et al. (2025) menjelaskan bahwa pembentukan lapisan partikel (*cake layer*) pada permukaan media filter menjadi salah satu penyebab utama peningkatan *pressure drop*. Selain itu, viskositas fluida dan struktur pori media filter juga berpengaruh terhadap resistansi aliran selama proses filtrasi

berlangsung.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Zhou et al. (2026) menunjukkan bahwa parameter desain filter seperti jumlah lipatan (*pleat*), diameter internal, dan distribusi aliran fluida berpengaruh terhadap nilai *pressure drop* pada sistem filtrasi. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa geometri media filter sangat mempengaruhi performa aliran fluida pada filter.

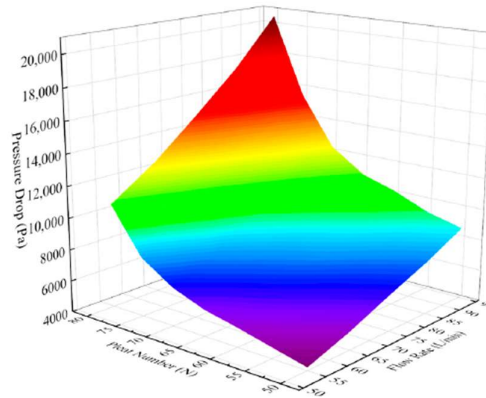


Figure 18. Pressure drop characteristics of filters with different pleat numbers

Gambar 2. 10 Pengaruh Lipatan dengan *Pressure Drop*
(Zhou et al., 2026)

Penelitian oleh Komariah et al. (2018) mengenai *fuel filter clogging* pada biodiesel menunjukkan bahwa peningkatan jumlah kontaminan dan endapan partikel menyebabkan filter mengalami penyumbatan lebih cepat serta meningkatkan tekanan diferensial pada filter. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa fenomena *clogging* sangat dipengaruhi oleh karakteristik fluida dan jumlah partikel yang tertahan pada media filter.

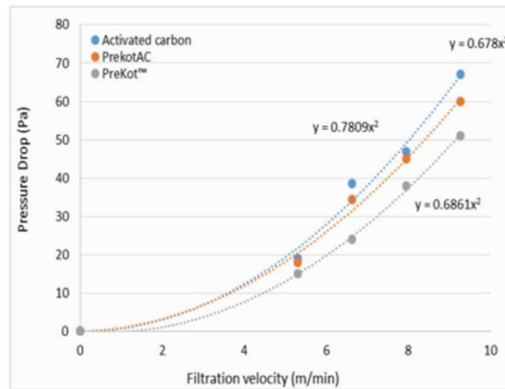


Figure 5. Visual impression of clogged filter for engine fuelled B20

Gambar 2. 11 Visual *Clogging*
(Komariah et al., 2018)

Penelitian oleh Hajar et al. (2016) menunjukkan bahwa ketebalan lapisan partikel dan permeabilitas media filter mempengaruhi kenaikan *pressure drop*.

Semakin besar akumulasi partikel pada media filter, maka aliran fluida akan semakin terhambat akibat berkurangnya porositas media filter.



Gambar 2. 12 Grafik *Pressure Drop* Hajar
(Hajar et al., 2017)

Jokinen et al. (2019) melakukan penelitian mengenai pengaruh tingkat kontaminasi oli, laju aliran, dan viskositas terhadap perkembangan *pressure drop* pada filter hidrolik. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan filter serat kaca dengan variasi tingkat kontaminasi, temperatur, dan debit aliran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kontaminasi dan penyumbatan filter menyebabkan kenaikan *pressure drop*, serta laju aliran dan viskositas turut memengaruhi perkembangan *pressure drop* selama proses filtrasi. Penelitian ini relevan dengan penelitian yang dilakukan karena sama-sama mengkaji karakteristik *pressure drop* pada sistem filtrasi oli akibat akumulasi kontaminan pada media filter.

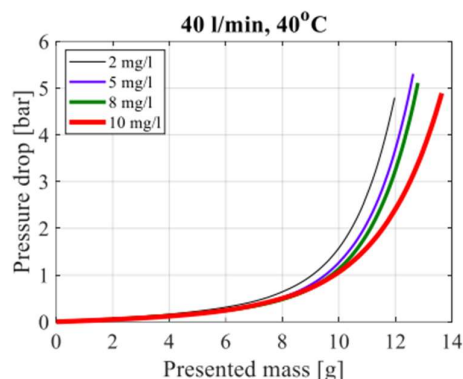


FIGURE 5: THE EXPERIMENTS WITH DIFFERENT GRAVIMETRIC CONTAMINATION LEVELS AT 40 L/MIN, 40 °C

Gambar 2. 13 Grafik *Pressure Drop*
(Jokinen et al., 2019)

Sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada filtrasi industri umum, aerosol, biodiesel, dan karakteristik media filter secara umum. Penelitian yang secara khusus membandingkan tiga jenis media filter oli, yaitu selulosa, sintetis, dan campuran, pada kondisi aliran oli yang sama dengan variasi kontaminan terkontrol dalam sistem pengujian skala laboratorium masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik *pressure drop* dan resistensi *clogging* pada berbagai jenis media filter oli dalam kondisi pengujian yang terkontrol.