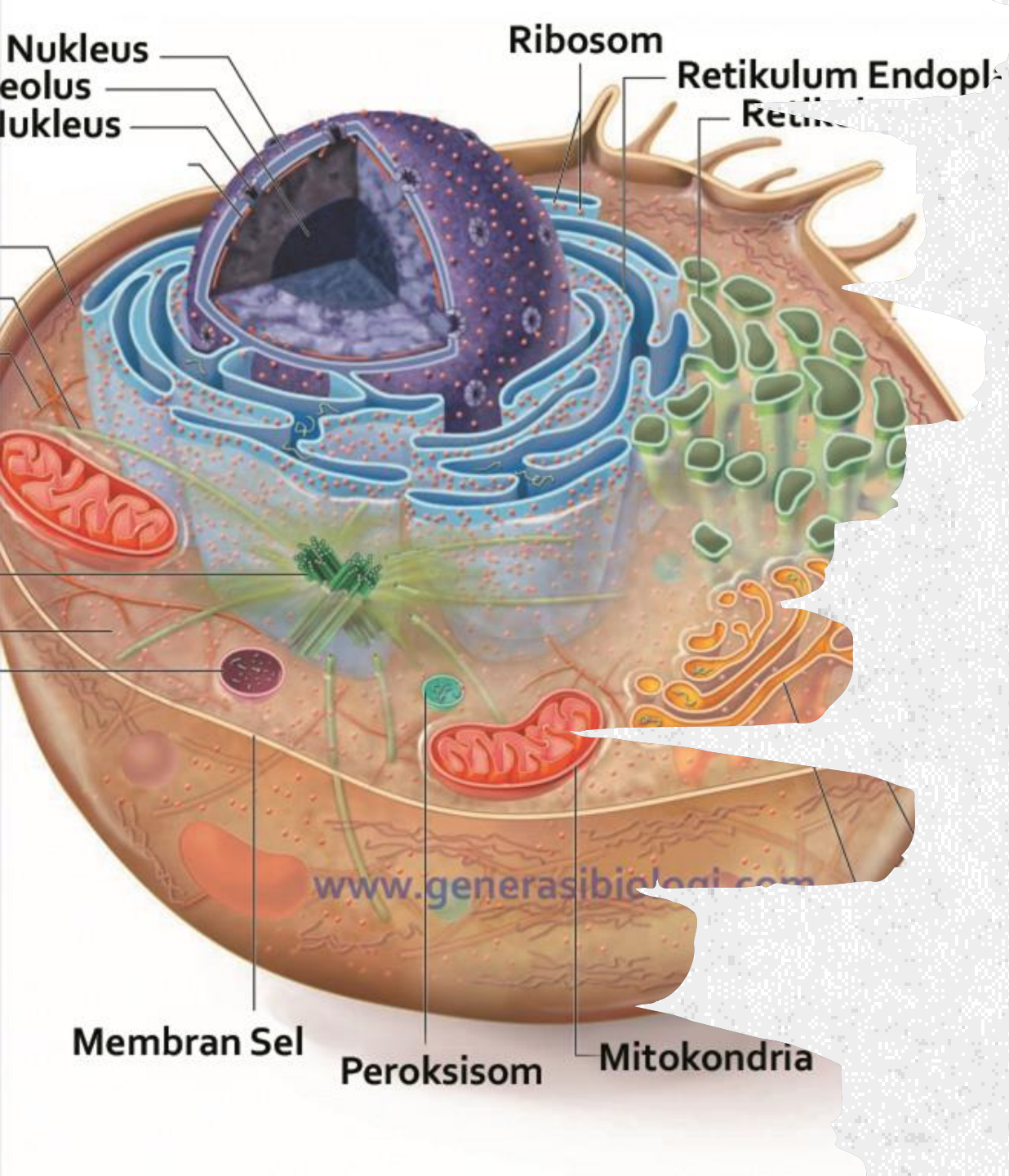


KINETIKA PERTUMBUHAN SEL

DODY GUNTAMA, S.T., M. Eng



APA ITU SEL?

TUJUAN PEMBELAJARAN

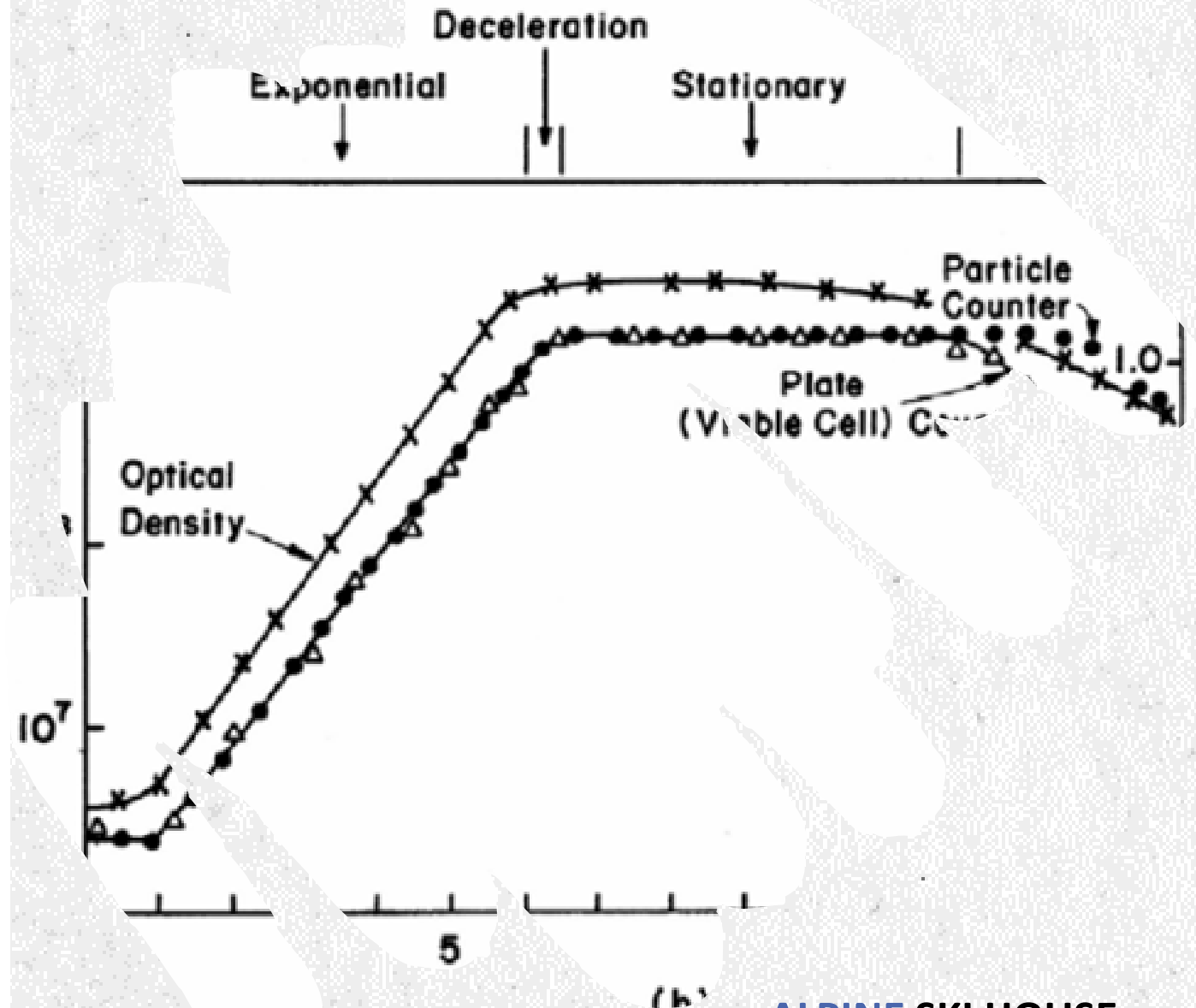
- Memahami kinetika pertumbuhan sel
- Pertumbuhan mikroorganisme dalam sistem batch

URAIAN MATERI

Pertumbuhan adalah respon yang paling penting dari mikroba terhadap lingkungan fisikokimianya. Pertumbuhan merupakan hasil dari replikasi dan perubahan ukuran sel. Mikroorganisme dapat tumbuh di bawah berbagai kondisi fisik, kimia, dan nutrisi. Dalam media dengan nutrisi yang sesuai, organisme mampu tumbuh dengan baik dengan memanfaatkan nutrisi untuk diubah menjadi berbagai senyawa metabolit, energi, serta biosintesis dan pembentukan produk.

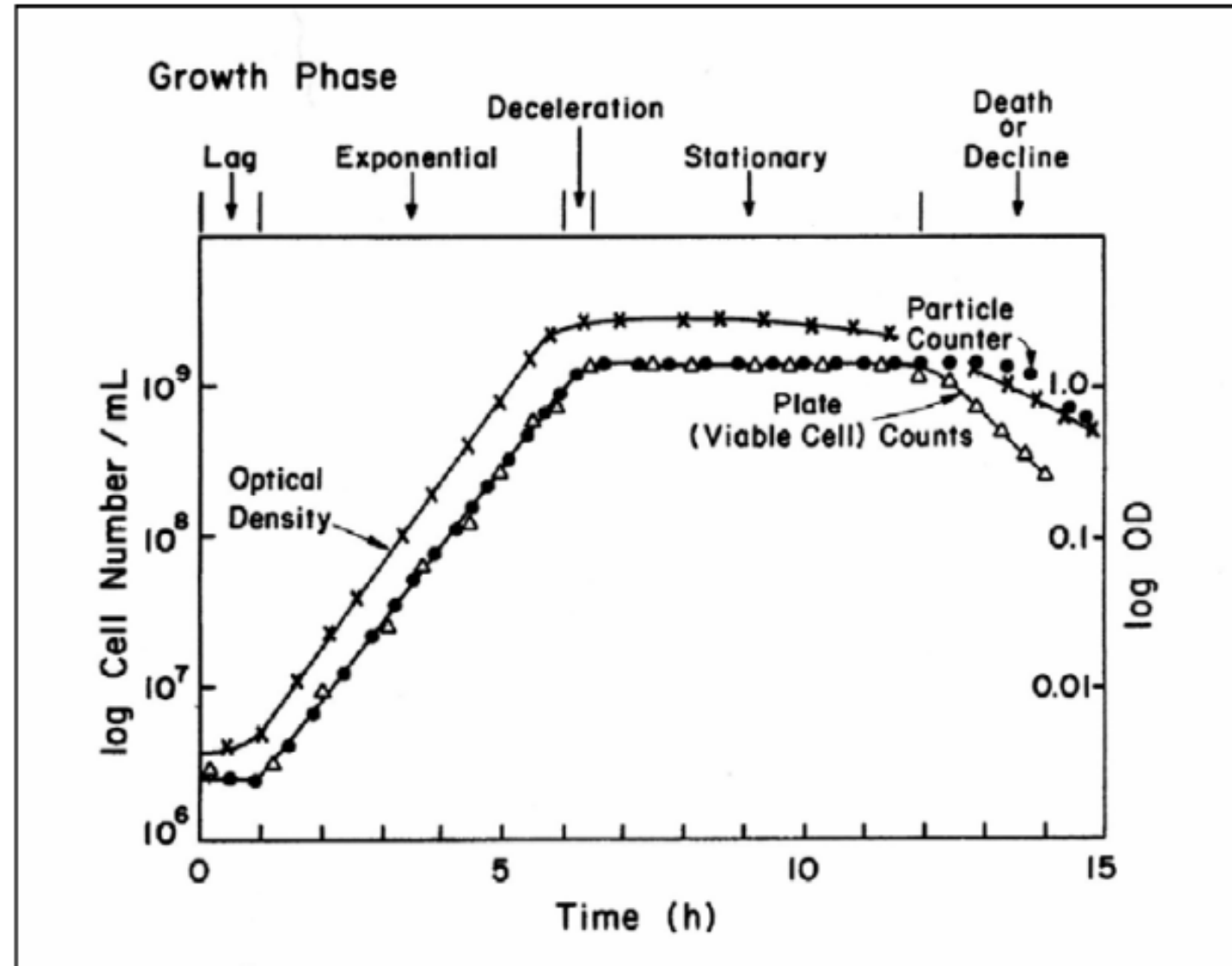
Seiring dengan waktu fermentasi, konsumsi nutrisi akan meningkatkan jumlah biomasanya. Secara teoritis, pertumbuhan sel sangat rumit karena jalur metabolisme yang juga rumit. Dalam bab ini, kita akan mempelajari bagaimana secara kuantitatif sel tumbuh berdasarkan pengamatan eksperimental, bagaimana kinetika yang rumit dapat disederhanakan serta bagaimana kultur sel dan fermentasi dimodelkan atau diprediksi secara kuantitatif.

FASE PERTUMBUHAN SEL



FASE PERTUMBUHAN SEL

Fase pertumbuhan sel secara batch biasanya dibagi dalam lima fase. yakni fase lag, fase logaritmik, fase penurunan, fase stasioner, dan fase kematian.



A.FASE LAG

Fase ini merupakan fase awal dari pertumbuhan sel. Pada fase ini sel mengalami adaptasi terhadap lingkungan barunya. Dalam prosesnya, terjadi metabolisme sel: terjadi sintesis enzim yang baru, terjadi peningkatan massa sel dan volume sel, namun tidak meningkatkan jumlah sel. Fase lag merupakan fase kritis dari pertumbuhan sel, apakah suatu proses pertumbuhan berhasil atau gagal.

Selama fase ini, massa sel hanya meningkat sedikit tanpa peningkatan kepadatan jumlah sel. Jika jumlah inokulum kecil dan memiliki kepadatan sel yang rendah atau nutrisi yang tidak sesuai, maka akan ada fase lag yang panjang (fase pseudo-lag). Umur kultur inokulum juga sangat berpengaruh terhadap lamanya fase lag. Oleh karena itu untuk memperpendek fase lag maka media pertumbuhan dan kondisi sebelum inokulasi harus sesuai, sel inokulum harus berumur muda (atau dalam fase eksponensial) dan aktif, serta jumlah inokulum harus besar (biasanya 5% sampai 10% volume).

B. FASE LOGARITMIK

Fase logaritmik juga disebut dengan fase eksponensial. Pada fase ini, sel telah menyesuaikan diri dengan lingkungan barunya dan menggandakan diri dengan sangat cepat dalam hitungan eksponensial. Dalam fase ini, semua komponen sel tumbuh pada kecepatan yang sama, nutrisi masih dalam keadaan ekses. Laju pertumbuhan spesifik biasa dihitung dari fase ini.

neraca massa sel dalam kultur batch dinyatakan dengan

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{net} X, \quad X = X_0 \text{ pada } t = 0$$

integrasi persamaan di atas menghasilkan

$$\ln \frac{X}{X_0} = \mu_{net} t, \text{ atau } X = X_0 e^{\mu_{net} t}$$

di mana X dan X_0 adalah konsentrasi sel pada waktu t dan $t=0$, $\mu_{net} = \mu_r = \mu_m$

μ_m adalah kecepatan spesifik maksimum (1/waktu)

Pada fase eksponensial juga dapat dihitung waktu penggandaan (doubling time), yakni waktu yang dibutuhkan untuk menggandakan sel mikroba.

$$\tau_d = \frac{\ln X / X_0}{\mu_{net}} = \frac{\ln 2}{\mu_{net}} = \frac{0.693}{\mu_{net}}$$

B. FASE LOGARITMIK

Tabel 6.1. Laju pertumbuhan spesifik beberapa mikroba

Bacteria or cells	Temperature (°C)	Specific growth rate (h ⁻¹)
<i>Escherichia coli</i>	40	2.0
<i>Aspergillus niger</i>	30	0.35
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	30	0.17–0.35
HeLa cell	37	0.015–0.023

Waktu yang diperlukan oleh sel untuk meningkatkan konsentrasi sel (massa atau jumlah) menjadi dua kalinya (waktu penggandaan (doubling time), t_d (h)) dapat dihitung dengan mengintegrasikan persamaan 6.5, diperoleh:

$$t_d = \frac{\ln 2}{\mu}$$

C. FASE PENURUNAN KECEPATAN

Pada fase ini terjadi penurunan kecepatan dari fase logaritmik dengan waktu yang sangat singkat. Selama fase penurunan, terjadi fenomena berkurangan satu atau lebih dari nutrisi penting, terjadi akumulasi produk samping yang merupakan racun bagi sel. (Seperti etanol dalam fermentasi yeast), sel juga mengalami perubahan struktur untuk meningkatkan ketahanan hidup.

Pada fase perlambatan, karena nutrisi sudah berkurang atau adanya akumulasi produk samping maka terjadi restrukturisasi sel sebagai respon terhadap kondisi lingkungan yang kurang sesuai. Model Malthus tidak dapat dipakai lagi pada fase ini. Verhulst memodifikasi model ini dengan menambahkan faktor penghambatan pertumbuhan biomassa, yang ditulis menjadi

$$r_X = kC_X \left(1 - \frac{C_X}{C_{X\infty}}\right) \quad (6.6)$$

di mana $C_{X\infty}$ adalah kapasitas sel dalam medium dan k adalah koefisien kapasitas sel. Integrasi persamaan (6.7) diperoleh:

$$C_X = \frac{C_{X0}e^{kt}}{1 - \frac{C_{X0}}{C_{X\infty}}(1 - e^{kt})} \quad (6.7)$$

D. FASE STASIONER

Fase ini terjadi seiring berkurangnya nutrisi substrat, meningkatnya produk metabolik sekunder, dan semakin banyaknya sel yang mati. Pada fase ini, laju pertumbuhan setara dengan laju kematian, tidak ada net growth dari populasi organisme, sel mengeluarkan lebih banyak metabolisme aktif untuk memproduksi metabolik sekunder. Contoh metabolik sekunder adalah antibiotik, pigmen, dll. Dalam fase ini juga dimungkinkan terjadi lisis pada sel, dan viabilitas sel akan menurun. Selama fase stasioner, satu atau lebih dari fenomena berikut ini mungkin terjadi:

- 1) Konsentrasi massa sel total tetap konstan, tetapi jumlah sel yang hidup berkurang.
- 2) Lisis sel dapat terjadi, dan massa sel yang hidup turun. Fase pertumbuhan kedua dapat terjadi, dimana sel tumbuh dengan mengonsumsi produk lisis dari sel (cryptic growth).
- 3) Sel tidak tumbuh tetapi memiliki metabolisme yang aktif untuk menghasilkan metabolit sekunder. Metabolisme sel berubah ketika konsentrasi metabolit tertentu (karbon, nitrogen, fosfat) rendah. Metabolit sekunder dihasilkan sebagai hasil dari deregulasi metabolit.

E. FASE KEMATIAN

Fase kematian ditandai dengan banyaknya sel yang mati dibandingkan dengan sel yang masih hidup. Hal ini disebabkan berkurangnya nutrisi dan metabolisme racun dari hasil reaksi samping (by-product).

$$\frac{dN}{dt} = -k_d N$$

k_d adalah konstanta laju kematian yang merupakan order satu. Perhitungan neraca massa sel di dalam reaktor menghasilkan:

$$-k_d C_X V = r_x V = \frac{d(C_X V)}{dt}$$

Integrasi persamaan 6.9 dengan V konstan diperoleh:

$$C_X = C_{X_{S0}} e^{-k_d t}$$

dimana $C_{X_{S0}}$ adalah konsentrasi massa sel pada awal fase stasioner.

TABEL 4.1. FASE PERTUMBUHAN SEL BERDASARKAN LAJU SPESIFIK

Fase	Deskripsi	Laju spesifik
Lag	Sel beradaptasi dengan lingkungan baru, laju pertumbuhan sangat rendah	$\mu \approx 0$
Logaritmik / eksponensial	Dimulainya pertumbuhan. Pertumbuhan mencapai laju maksimum	$\mu < \mu_{max}$
Penurunan	Laju menurun seiring berkurangnya nutrisi Tidak ada laju pertumbuhan	$\mu \approx \mu_{max}$
Stasioner	Sel menurun	$\mu = 0$
Kematian		$\mu > \mu_{max}$

CONTOH

- Suatu percobaan fermentasi di laboratorium diperoleh data percobaan sebagai berikut :
- a. Tentukan laju pertumbuhan spesifik selama fase pertumbuhan
- b. Berapakah doubling time nya?

Waktu (hari)	Konsentrasi sel (sel/ml x 10 ⁻⁶)
0	0,45
0,2	0,52
0,5	0,65
1	0,81
1,5	1,22
2	1,77
2,5	2,13
3	3,55
3,5	4,02
4	3,77
4,5	2,20

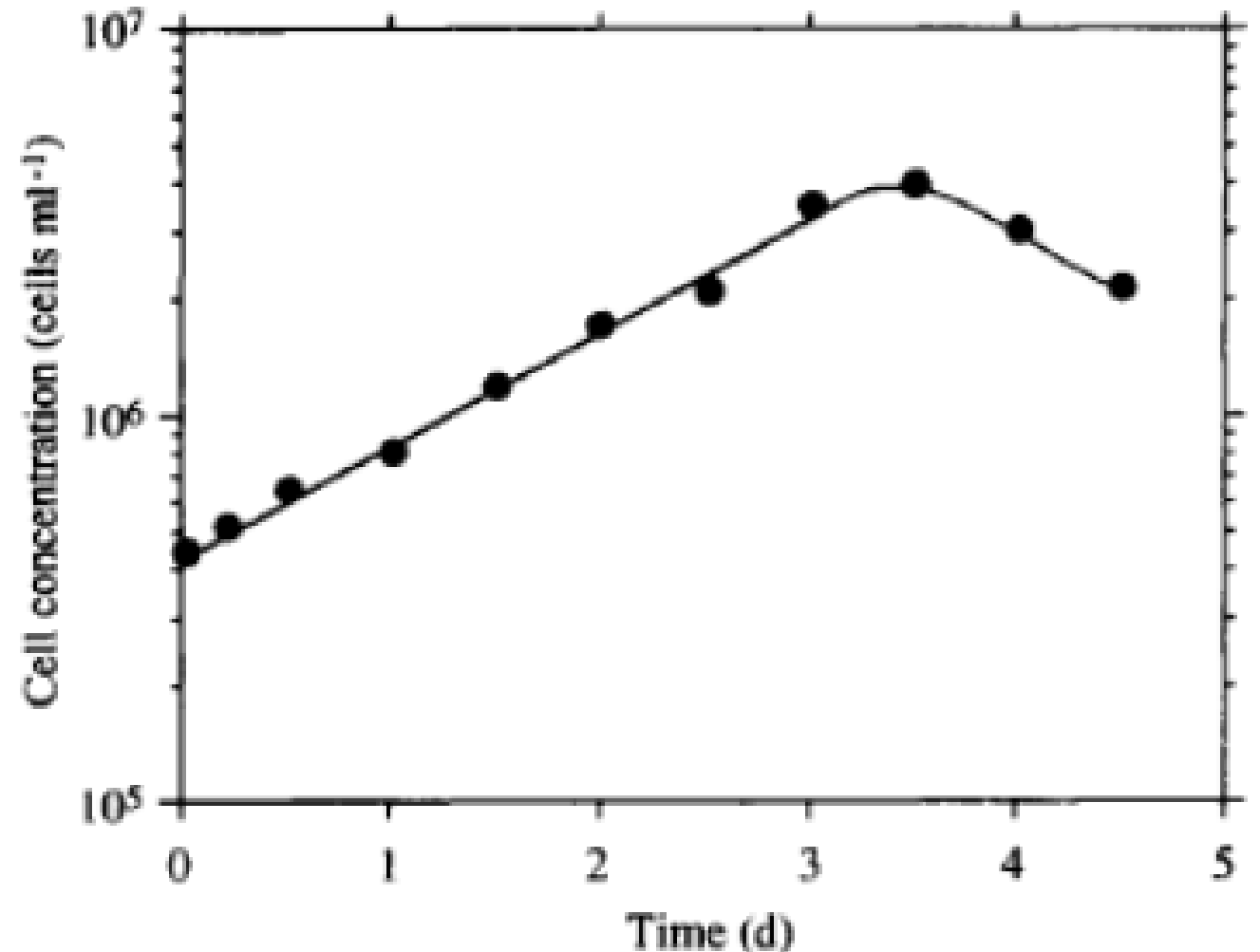
PENYELESAIAN

- Data dibuat dalam bentuk grafik semi log, plot antara waktu (y) dengan konsentrasi sel (x).
- dari grafik diketahui bahwa tidak ada waktu lag (adaptasi) sehingga laju pertumbuhan spesifik dari sel dapat dihitung dari hari pertama (hari ke-0), sedangkan pada hari ke-3,5 telah terjadi penurunan sel.

Sesuai persamaan, $\mu = \frac{\ln x - \ln x_0}{t - t_0}$, diperoleh hasil sebesar 0,67/hari.

b. Dari persamaan

$$td = \ln 2 / 0,67 = 1. \text{ hari}$$





PERTUMBUHAN BATCH

Kinetika Pertumbuhan Sel

PERTUMBUHAN BATCH

Pada sesi sebelumnya telah dijelaskan mengenai fase pertumbuhan organisme dalam bentuk batch yang terdiri dari fase adaptasi hingga fase kematian. Selama fase pertumbuhan dan penurunan, kecepatan pertumbuhan sel secara umum dapat dinyatakan dengan persamaan: $r_x = \mu x$

di mana r_x adalah kecepatan produksi volumetrik biomassa (contoh $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$), x adalah konsentrasi sel yang terukur (contoh kg/m^3), dan μ adalah laju pertumbuhan spesifik dengan satuan $1/\text{waktu}$ (contoh s^{-1}).

Dalam sistem tertutup di mana pertumbuhan adalah faktor satu satunya yang berpengaruh terhadap konsentrasi sel, $= \frac{dx}{dt}$. Integrasi persamaan dapat dinyatakan dalam bentuk lain dengan kondisi pembatas $x=x_0$ pada $t=0$, sehingga

$$x = x_0 e^{\mu t} \dots\dots\dots(4.2.)$$

PERTUMBUHAN BATCH

di mana x_0 adalah konsentrasi sel pada waktu ke-0. Persamaan tersebut merepresentasikan pertumbuhan eksponensial, sedangkan dalam bentuk logaritmik dapat dinyatakan sebagai

$$\ln x = \ln x_0 + \mu t \dots\dots\dots(4.3)$$

berdasarkan persamaan 4.3., plot antara $\ln x$ terhadap waktu dapat memberi hasil garis lurus dengan slope μ .

Laju pertumbuhan sel juga dapat dinyatakan dalam bentuk *doubling time* t_d . Dengan memodifikasi persamaan 4.3, di mana $t=t_d$ adalah $2x_0$, maka diperoleh persamaan

$$2x_0 = x_0 e^{\mu t_d} \dots\dots\dots (4.4.)$$

atau dengan mengeliminasi x_0 , menjadi

$$2 = e^{\mu t_d} \dots\dots\dots (4.5.)$$

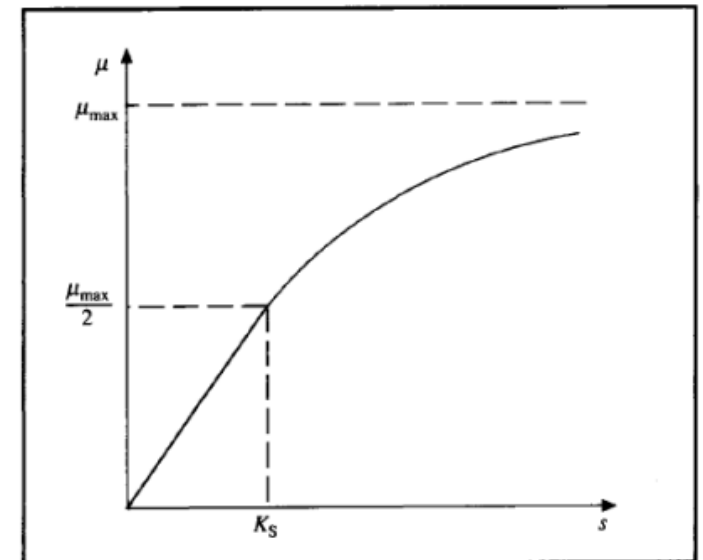
dengan modifikasi logaritmik diperoleh persamaan $\ln 2 = \mu t_d$ atau $t_d = \ln 2 / \mu$

EFEK KONSENTRASI SUBSTRAT

Konsentrasi substrat merupakan faktor penting dalam pertumbuhan organisme. Substrat yang paling berpengaruh dalam pertumbuhan biasanya adalah sumber karbon dan nitrogen. Persamaan yang mungkin dapat digunakan untuk menyatakan hal tersebut adalah persamaan Monod, homolog dari persamaan Michaelis-Menten

$$\mu = \frac{\mu_{max}CS}{K_s + C_{S0}} \dots\dots\dots (4.6.)$$

K_s adalah parameter intrinsik dari sistem substrat sel dengan satuan yang sama dengan konsentrasi substrat. Beberapa nilai K_s dapat dilihat pada Tabel 4.3. atau dengan membuat grafik hubungan antara substrat dengan laju pertumbuhan seperti pada Gambar 4.3. K_s dapat diperoleh setelah dilakukan plot sesuai persamaan 4.6., di mana nilai $\frac{\mu_{max}}{2}$ akan memberikan nilai K_s setelah dilakukan plotting kurva s terhadap μ



Gambar 4.3. Hubungan antara konsentrasi substrat terhadap laju pertumbuhan dengan pemodelan Monod (Pauline, 1995)

Tabel 4.3. Nilai Ks Untuk Beberapa Genus Mikroorganisme Dan Substra Yang Digunakan (Pauline, 1995) Here

Mikroorganisme (Genus)	Substrat berpengaruh	Ks (mg/l)
<i>Saccharomyces Escherichia</i>	Glukosa	25
	Glukosa	4
	Laktosa	20
<i>Aspergilus</i>	Phosphate	1.6
<i>Candida</i>	Glukosa	5
	Gliserol	4.5
<i>Pseudomonas</i>	Oksigen	0,042-0,045
	Methanol	0,7
<i>Klebsiella</i>	Methana	0,4
	Karbon dioksida	0,4
	Magnesium	0,56

Kinetika Produksi pada Kultur Sel (Pauline, 1995)

KINETIKA PRODUKSI PADA KULTUR SEL (PAULINE, 1995)

Produk fermentasi dapat diklasifikasikan berdasarkan hubungan antara sintesis produk dengan akumulasi energi yang dihasilkan dalam sel. Tiga tipe metabolit tersebut adalah;

- A. Produk kontak langsung dengan pembentukan energi di dalam sel. Contoh produk: ethanol, asam asetat, aseton, asam glukonak, butanol, asam laktat, produk lain dari fermentasi anaerob.
- B. Produk tidak kontak secara langsung dengan pembentukan energi. Contoh produk: asam amino dan derivatnya, asam sitrat, dan nukleotid.
- C. Produk antara, yakni produk di antara kontak secara langsung dan tidak kontak secara langsung terhadap pembentukan energi. Contoh produk: penisilin, vitamin, dan streptomycin

PEROLEHAN BIOMASSA

Pirt (1975) mengkaitkan kinetika pertumbuhan dengan produk yang terkait dengan pertumbuhan sel secara sederhana. Parameter perolehan (*yield*) seperti biomassa dan produk yang dihasilkan selama pertumbuhan sel dinyatakan terhadap konsumsi bahan yang lain. Untuk perolehan biomassa dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$Y_{X/S} = \frac{C_X - C_{X0}}{C_{S0} - C_S} \tag{6.11}$$

di mana C_S adalah konsentrasi massa substrat, C_{S0} dan C_{X0} masing-masing adalah nilai awal C_S dan C_X . Perolehan sel untuk beberapa mikroorganisme dengan beberapa substrat diberikan pada Tabel 6.2. Pertumbuhan sel dapat juga dinyatakan dalam nutrisi yang lain, seperti oksigen:

$$Y_{X/O_2} = \frac{dC_X|_{growth}}{-d[O_2]} \tag{6.12}$$

Sedangkan untuk laju perolehan produk dapat dinyatakan sebagai:

$$Y_{P/S} = \frac{dC_P}{-dS} \tag{6.13}$$

Microorganisms	Substrate	Y_{xS} (kg dry cell (kg substrate) ⁻¹)
<i>Aerobacter aerogenes</i>	Glucose	0.40
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Glucose (aerobic)	0.50
<i>Candida utilis</i>	Glucose	0.51
<i>Candida utilis</i>	Acetic acid	0.36
<i>Candida utilis</i>	Ethanol	0.68
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Glucose	0.38

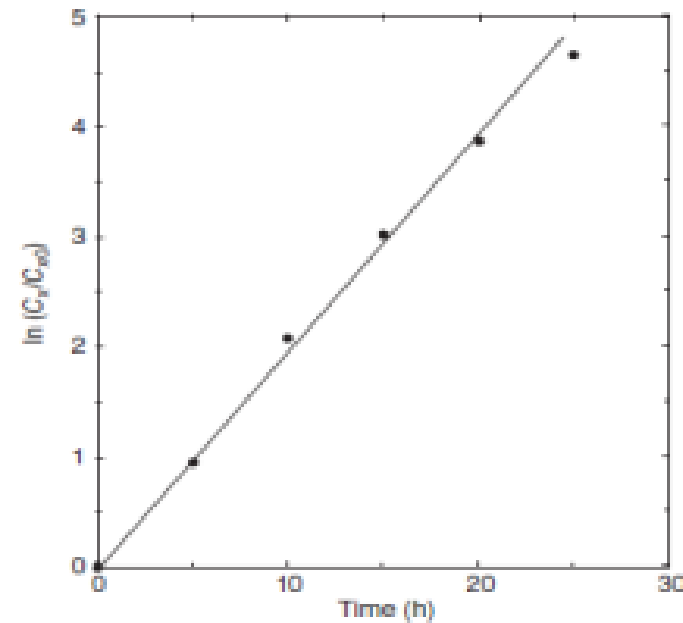
Contoh 6.1

Sel ragi tumbuh pada fase eksponensial. Konsentrasi massa sel diberikan pada tabel di bawah. Hitung laju pertumbuhan spesifik, μ_{max} .

Waktu (jam)	0	5	10	15	20	25
Konsentrasi sel, C_X	0,5	1,3	4,0	10,2	24,0	52,5

PENYELESAIAN

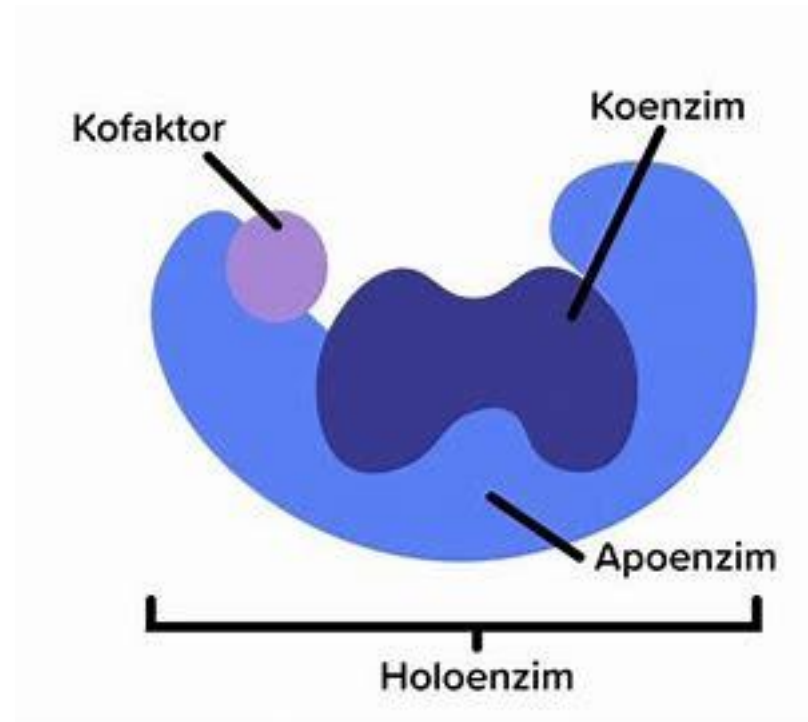
Plot $\ln (C_x/C_{x0})$ terhadap waktu kultivasi (Gambar 6.2) memberikan garis lurus, dengan kemiringan yang merupakan nilai $\mu_{\max} = 0,20 \text{ jam}^{-1}$.



Gambar 6.2. Penentuan laju pertumbuhan spesifik pada fase pertumbuhan eksponensial

LATIHAN

1. Escherichia coli tumbuh dengan waktu penggandaan 0,5 jam ketika pada fase pertumbuhan eksponensial.
 - a. Berapa nilai laju pertumbuhan spesifik?
 - b. Berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk menumbuhkan kultur sel dari 0,1 menjadi 10 kg sel kering.m⁻³?
2. E. coli tumbuh dari 0,10 menjadi 0,50 kg sel kering.m⁻³ dalam waktu 1 jam.
 - a. Dengan asumsi pada periode ini adalah fase pertumbuhan eksponensial, hitung laju pertumbuhan spesifiknya.
 - b. Hitung waktu penggandaan selama fase pertumbuhan eksponensialnya.
 - c. Berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk tumbuh dari 0,10 menjadi 1,0 kg sel kering.m⁻³?



ENZIM

Dasar Bioproses

Dody Guntama, S.T., M. Eng

Materi Pembelajaran

Klarifikasi Enzim

Kerja Enzim, Struktur, dan bagian enzim

Karakteristik Penting Enzim

Faktor yang Berpengaruh

Kinetika Reaksi Enzimatis

Jenis-Jenis Inhibisi Enzim



ENZIM?



Kinetika Reaksi Enzimatis

a) Langkah Pembatas Laju Reaksi

Langkah pembatas laju dari setiap reaksi adalah langkah yang berjalan paling lambat, dan langkah ini yang menentukan laju reaksi secara keseluruhan. Dalam reaksi enzimatik, konversi kompleks ES menjadi produk pada umumnya merupakan langkah pembatas, oleh karena itu laju reaksi enzimatik secara keseluruhan tergantung pada langkah ini. Dissosiasi kompleks menjadi produk berbanding lurus dengan konsentrasi kompleks ES, dimana konsentrasinya akan selalu berubah selama reaksi berlangsung, sehingga laju pembentukan produk juga berubah. Ketika reaksi mencapai kesetimbangan (steady state phase/fase keadaan tunak) konsentrasi ES (dan juga laju reaksi) akan relatif konstan. .

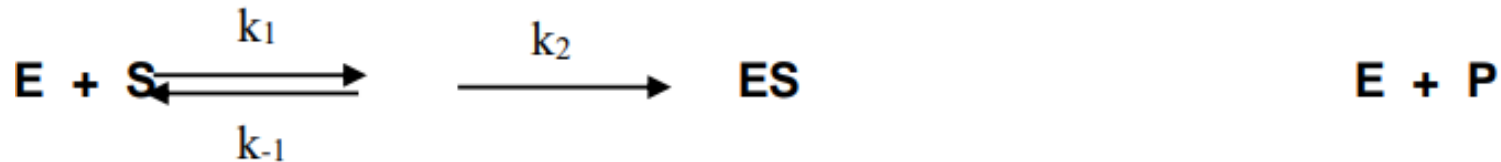
b) Kinetika Reaksi

Ketika enzim ditambahkan ke substrat, reaksi terjadi dalam tiga tahap dengan kinetika yang berbeda:

Fase	Konsentrasi ES	Laju pembentukan produk
Sebelum keadaan tunak	Pembentukan kompleks ES terjadi sangat cepat	Pada awalnya laju lambat, namun setelah kompleks ES terbentuk laju meningkat dengan cepat
Keadaan tunak (kesetimbangan)	Konsentrasi ES konstan dimana laju pembentukan kompleks sama dengan laju peruraiannya	Laju konstan dan lebih tinggi dari fase sebelum tunak
Setelah keadaan tunak	Substrat mulai habis sehingga laju pembentukan kompleks melambat	Laju lambat karena pembentukan kompleks ES menurun disebabkan oleh substrat mulai habis

c) Kinetika Michaelis-Menten

Kinetika Michaelis-Menten disebut juga dengan kinetika saturasi adalah model kinetika enzim yang menjelaskan bagaimana laju reaksi bergantung pada konsentrasi enzim dan substrat. Sebagian besar reaksi enzimatik mengikuti kinetika Michaelis-Menten. Reaksi di mana enzim (E) mengikat substrat (S) secara reversibel membentuk kompleks enzim-substrat (ES), yang kemudian bereaksi secara ireversibel untuk membentuk produk (P) dan melepaskan enzim lagi.



Asumsi yang berlaku adalah:

- Reaksi pembentukan kompleks berjalan dengan cepat;
- Reaksi balik pada reaksi 2 diabaikan (irreversibel);
- Akumulasi produk tidak berpengaruh terhadap reaksi 1

$$K_1 = \frac{k_1}{k_{-1}}$$

k_1 = konstanta laju pembentukan kompleks ES

k_{-1} = konstanta laju reaksi pemecahan kompleks ES ke E bebas

$k_2 = k_{\text{cat}}$ = konstanta laju pembentukan P dari kompleks ES

Laju pembentukan produk dapat dinyatakan dengan

$$v_P = v_2 = k_2[ES]$$

$$v_{ES} = v_1 - v_2 = k_1[E][S] - k_{-1}[ES] - k_2[ES]$$

Selama reaksi enzim tidak habis dan keadaan awal = akhir

$$[E] = [E_0] - [ES]$$

Dimana:

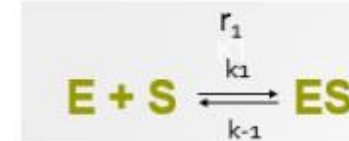
v = laju reaksi

E_0 = konsentrasi enzim awal

E = konsentrasi enzim

Untuk menurunkan persamaan kinetiknya, dua pendekatan model dapat digunakan, yaitu:

1. Kesetimbangan reaksi yang cepat tercapai
2. Pseudo-steady state



Kesetimbangan Reaksi Yang Cepat Tercapai

$$0 = r_1 = k_1[E][S] - k_{-1}[ES]$$

$$K_M = \frac{k_{-1}}{k_1} = \frac{[E][S]}{[ES]}$$

Substitusi pers (12.7) ke (12.8):

$$[ES] = \frac{[E_0][S]}{K_M + [S]}$$

Substitusi pers (12.9) ke (12.3):

$$v_P = k_2[ES] = \frac{k_2[E_0][S]}{K_M + [S]}$$

v_{max} terjadi jika seluruh sisi aktif enzim berikatan dengan substrat membentuk kompleks.

$$[E_0] = [ES] + [E]$$

$$[E_0] = [ES]$$

$$v_{max} = k_2[E_0]$$

Substitusi Pers (12.12) ke Pers (12.10) menjadi:

$$v_P = \frac{v_{max}[S]}{K_M + [S]}$$

Pers (12.13) dikenal dengan kinetika Michaelis-Menten, dimana:

v_p = laju pembentukan produk

v_{max} = laju maksimum

$[S]$ = konsentrasi substrat

K_M = konstanta Michaelis-Menten

Asumsi Pseudo-Steady State

Pada keadaan tunak laju pembentukan $[ES]$ = laju penguraian $[ES]$

$$k_1[E][S] = k_{-1}[ES] + k_2[ES]$$

$$\frac{k_{-1} + k_2}{k_1} = \frac{[E][S]}{[ES]} = K_M$$

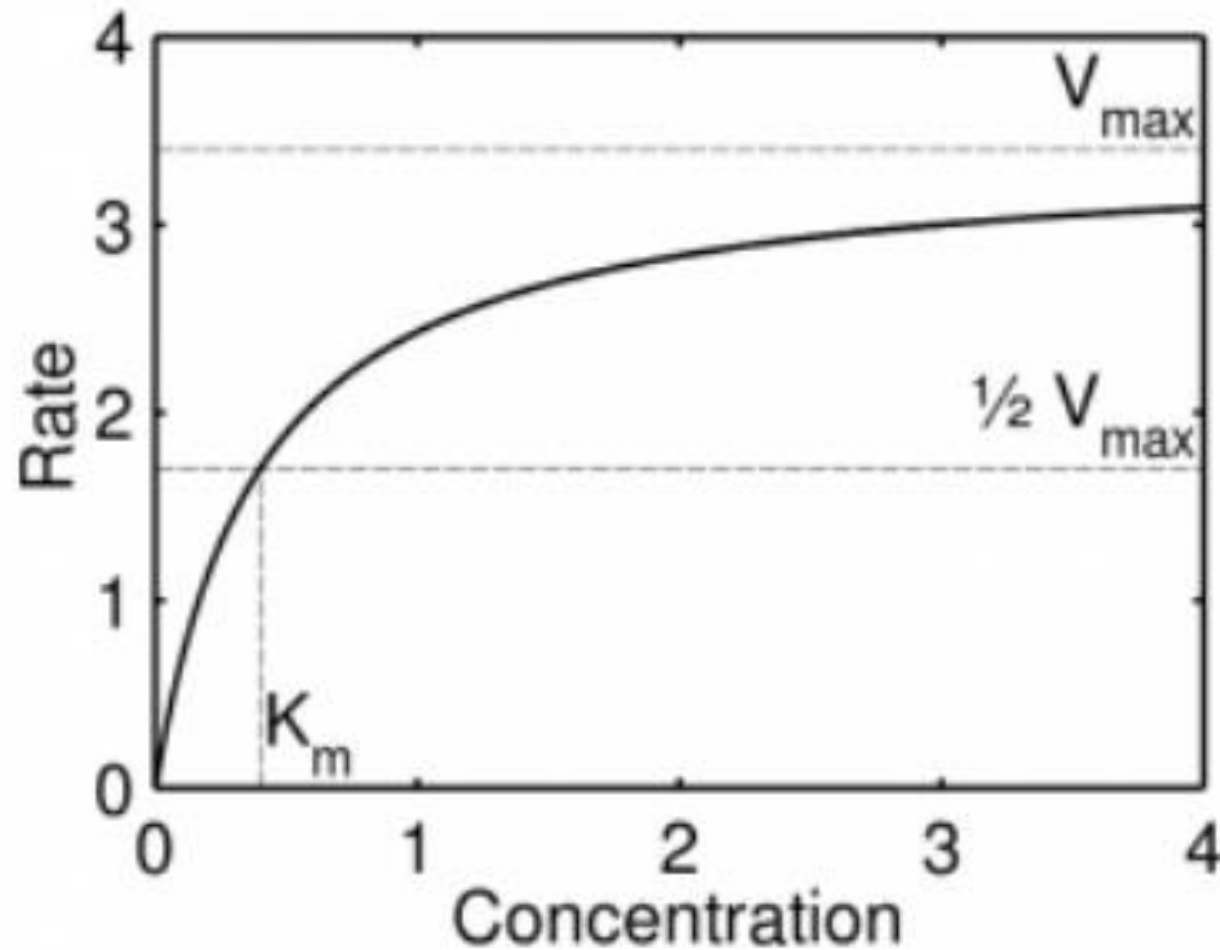
$$[ES] = \frac{[E][S]}{K_M} = \frac{([E_0] - [ES])[S]}{K_M} = \frac{[E_0][S] - [ES][S]}{K_M}$$

$$K_M[ES] = [E_0][S] - [ES][S]$$

$$[ES] = \frac{[E_0][S]}{K_M + [S]}$$

$$v_P = k_2[ES] = \frac{[E_0][S]}{K_M + [S]}$$

Grafik plot antara laju reaksi dengan konsentrasi substrat yang dapat dinyatakan dengan kinetika Michaelis-menten



Parameter-Parameter Penting dalam Kinetika Michaelis-Menten

- 1) V_{max} – kecepatan maksimum reaksi yang dapat terjadi ketika semua sisi aktif enzim jenuh dengan substrat.
- 2) K_M (mol.L^{-1}). Dikenal sebagai konstanta Michaelis-Menten – konsentrasi substrat di mana laju reaksi adalah 50% dari v_{max} . Dengan asumsi pH, suhu, dan keadaan redoks yang stabil, K_M untuk enzim tertentu adalah konstan. Parameter ini memberikan indikasi kekuatan pengikatan (afinitas) enzim ke substratnya.
- 3) k_{cat} (s^{-1}). k_{cat} (k katalitik), disebut juga dengan turnover enzymes number, merupakan nilai katalitik maksimum dalam menghasilkan pada kondisi substrat jenuh per unit waktu per unit enzim.
- 4) Efisiensi Enzim ($\text{s}^{-1} (\text{mol.l}^{-1})^{-1}$). Rasio k_{cat}/K_M didefinisikan sebagai efisiensi katalitik dan dapat digunakan sebagai pengukuran untuk spesifisitas substrat. Jika k_{cat} jauh lebih besar dari k_{-1} , proses katalitik berlangsung sangat cepat dan efisiensi enzim bergantung pada kemampuannya untuk mengikat substrat.

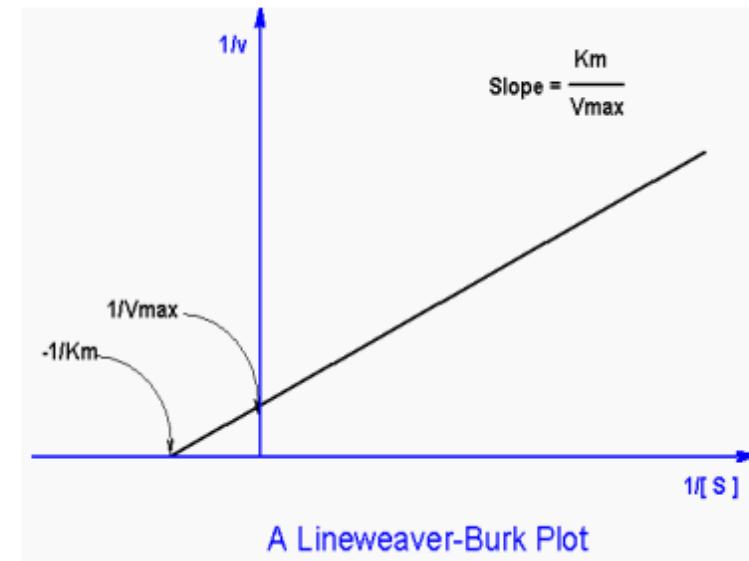
Plot Lineweaver-Burk

Guna memudahkan mencari parameter v_{max} dan K_M maka digunakan plot Lineweaver-Burk, yang memplot nilai kebalikan dari laju reaksi ($1/v$) terhadap kebalikan dari konsentrasi substrat ($1/[S]$). Plot ini menghasilkan garis lurus dan memberikan interpretasi yang lebih mudah, dimana perpotongan garis dengan sumbu y merupakan nilai $1/v_{max}$ dan perpotongan dengan sumbu x merupakan nilai $1/K_M$. Plot Lineweaver-Burk juga berguna ketika menentukan jenis penghambatan enzim yang ada dengan membandingkan pengaruhnya terhadap K_M dan v_{max}

$$v_p = \frac{v_{max}[S]}{K_M + [S]}$$

$$\frac{1}{v_p} = \frac{K_M}{v_{max}[S]} + \frac{1}{v_{max}}$$

$$\frac{1}{v_p} = \frac{K_M}{v_{max}} \frac{1}{[S]} + \frac{1}{v_{max}}$$





TERIMA KASIH

TERIMA KASIH

