

Enzim moduláció

Enzim inhibíció és kinetikája



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

Az enzim felületén:

Szubsztrátkötő-hely

Katalitikus domain = AKTIV CENTRUM

} lehetnek azonosak is

Az aktivitást befolyásolhatják:

További kötőhelyek:

fémionok (ionos és kelát formában)

modulátor molekulák (inhibítor, aktivátor)

A fehérje kovalens módosítása:

foszforilezés

glikozilálás

proteolízis



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

2

ENZIM MODULÁCIÓ

Modulátorok hatása

Inhibitorok:
csökkentik a
reakciósebességet

v_i

Az inhibíció mértéke:


$$\mathcal{E}_i = \frac{v_0 - v_i}{v_0}$$

Aktivátorok:
növelik a
reakciósebességet

v_a

az aktiválás mértéke:

$$\mathcal{E}_a = \frac{v_a - v_0}{v_0}$$



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

3

INHIBÍCIÓ

REVERZIBILIS

$$E + S \rightleftharpoons ES \longrightarrow E + P$$

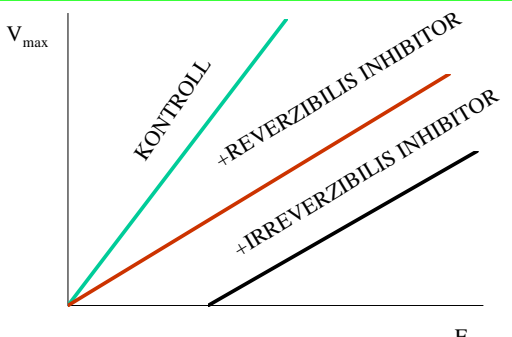
↓↑
EI


IRREVERZIBILIS

$$E + S \xrightleftharpoons{K_s} ES \xrightarrow{k_2} E + P$$

↓
EI

eldöntése:





ny Tanszék

4

INHIBÍCIÓ

komplett, teljes

részleges inhibíció

Az enzim a kötődés hatására teljesen elveszti aktivitását.

Az aktivitás csak csökken, egy része megmarad.

„Lineáris” inhibíció

„Hiperbolikus” inhibíció →

A DIXON féle linearizált kinetikai diagramok alakjából.

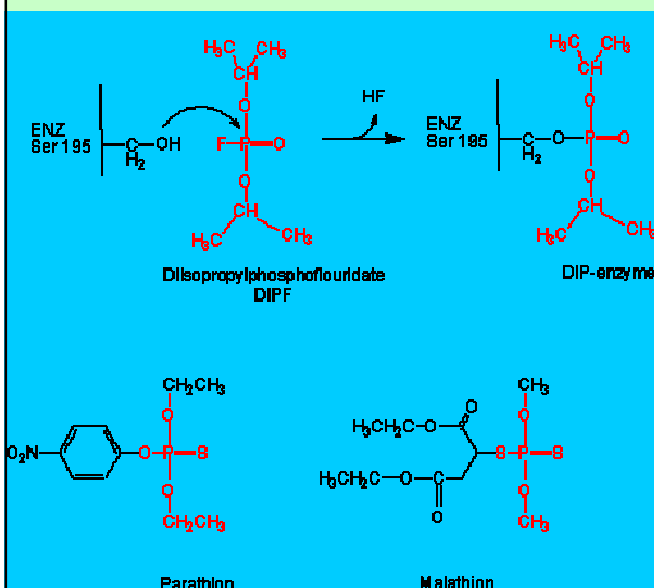
DIXON ábrázolás: $1/v - I$ (inhibitor koncentráció)



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

5

Irreverzibilis inhibitorok



Di-izopropyl-foszfofluoridát: a sarin ideggáz prototípusa Irreverzibilisen inaktíválja az acetilkolinészterázt (Ser-proteázokat). A Ser195-hez kovalensen kötődik (az aktív centrumban)

Hasonlók: [Malathion](#) , [ethyl parathion](#) (szerves foszfát peszticidek)



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

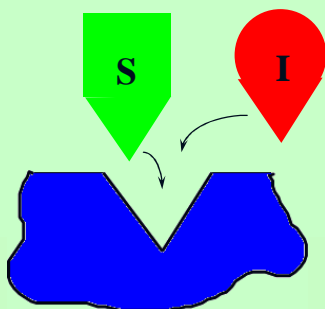
6

1. Kompetitív inhibíció

Versengés S és I között az E aktív helyéért, vagy-vagy:
kölcsonös kizárás

I lehet:

- szubsztrát analóg
- alternatív szubsztrát
- termék



1. MODELL: Klasszikus kompetitív inhibíció
Az I verseng S-sel ugyanazon aktív hely elfoglalásáért

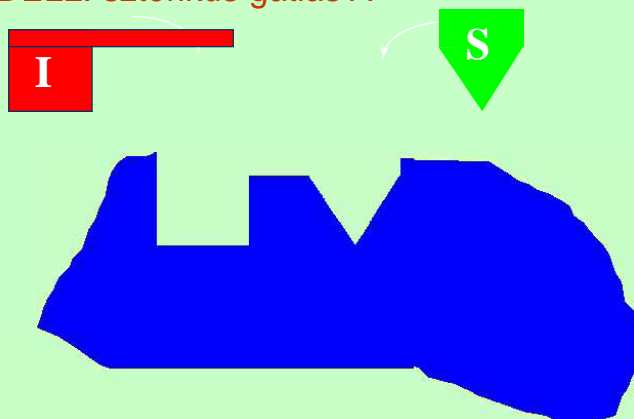


BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

7

Kompetitív inhibíció

2. MODELL: sztérikus gátlás A



I kötődése egy másik kötőhelyhez térbelileg gátolja S-nek
az aktív helyhez kötését.

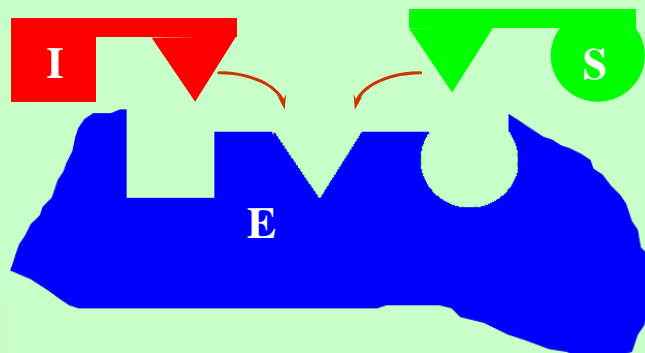


BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

8

Kompetitív inhibíció

3. MODEL: sztérikus gátlás B



I és az S egy analóg része verseng egy közös kötőhelyért.

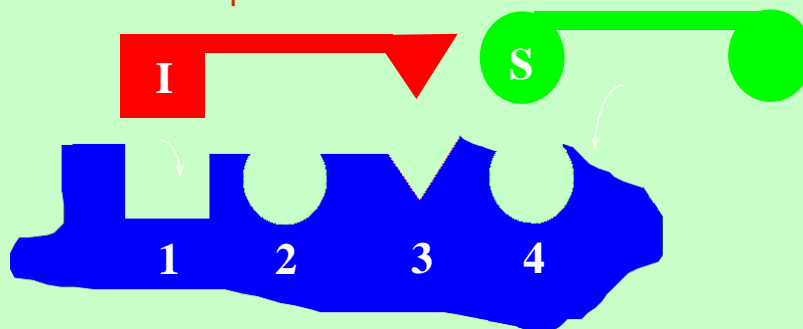


BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

9

Kompetitív inhibíció

4. MODEL: átlapolás



1 és 3 kötőhely köti az inhibitor, a 2 és 4 kötőhely pedig a szubsztátot, de egymást kölcsönösen kizárják.



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

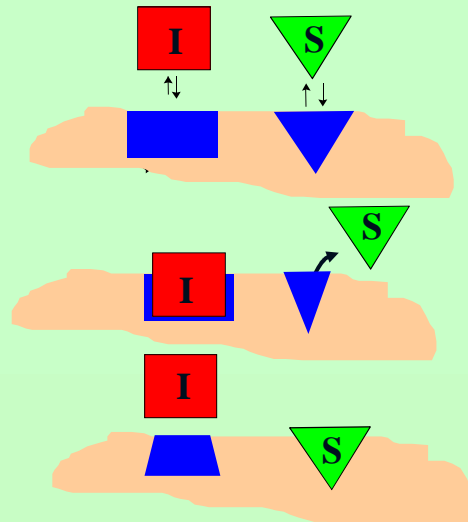
10

Kompetitív inhibíció

5. MODELL:

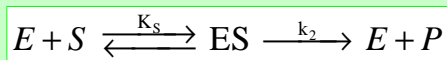
I kötődése az enzimhez konformáció változást okoz az enzimben és ez megakadályozza **S**-nek az aktív centrumhoz kötődését.

Ilyen a végtermék gátlás (feedback inhibíció) is.



A kompetitív inhibíció kinetikája

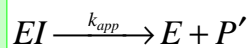
A klasszikus kompetitív inhibíció kinetikája:



+

I

$\updownarrow K_i$



$$K_s = \frac{E \cdot S}{(ES)}$$

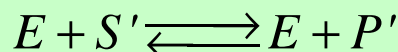
$$K_i = \frac{E \cdot I}{(EI)}$$

- ha $k_{app} > 0$ akkor I alternatív szubsztrát
- ha $k_{app} = 0$ akkor I „dead end” kompetitív inhibitor



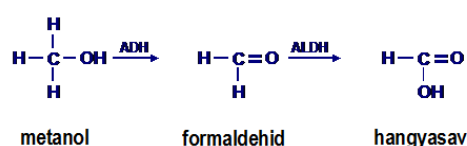
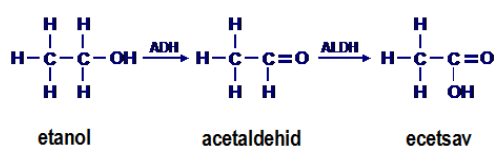
A kompetitív inhibíció kinetikája

Alternatív szubsztrát: az enzim az analóg szerkezetű molekulával is végrehajtja a reakciót → *alternatív termék* keletkezik.



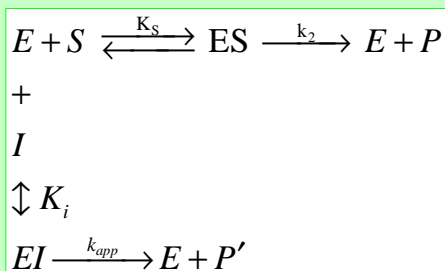
A csoportspecifikus és régióspecifikus enzimeknek értelem-szerűen több alternatív szubsztrátja van.

Példa: máj enzimek: alkohol dehidrogenáz, aldehid dehidrogenáz



A kompetitív inhibíció kinetikája

Analóg kinetikai levezetés:



anyagmérleg az enzimre:

$$K_s = \frac{E \cdot S}{(ES)}$$

$$K_i = \frac{E \cdot I}{(EI)}$$

a „minket érdeklő” reakciósebesség:

$$V = \frac{dP}{dt} = k_2 (ES)$$

$$E_0 = E + (ES) + (EI)$$



A kompetitív inhibíció kinetikája

Osszuk el a két egyenletet:

$$\frac{V}{E_o} = \frac{k_2(ES)}{E + (ES) + (EI)}$$

Helyettesítsük be:

$$K_s = \frac{E \cdot S}{(ES)}$$

$$K_i = \frac{E \cdot I}{(EI)}$$

$$\frac{V}{E_o} = \frac{k_2 E \frac{S}{K_s}}{E + E \frac{S}{K_s} + E \frac{I}{K_i}}$$



$$\frac{V}{k_2 E_o} = \frac{\frac{S}{K_s}}{1 + \frac{S}{K_s} + \frac{I}{K_i}}$$

$$V_{\max} = k_2 E_o$$



A kompetitív inhibíció kinetikája

A sebességet végül ebben az egyszerű formában írhatjuk fel:

$$\frac{V}{V_{\max}} = \frac{S}{K_s \left(1 + \frac{I}{K_i} \right) + S}$$

vagy:

$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s \left(1 + \frac{I}{K_i} \right) + S}$$

vagy:

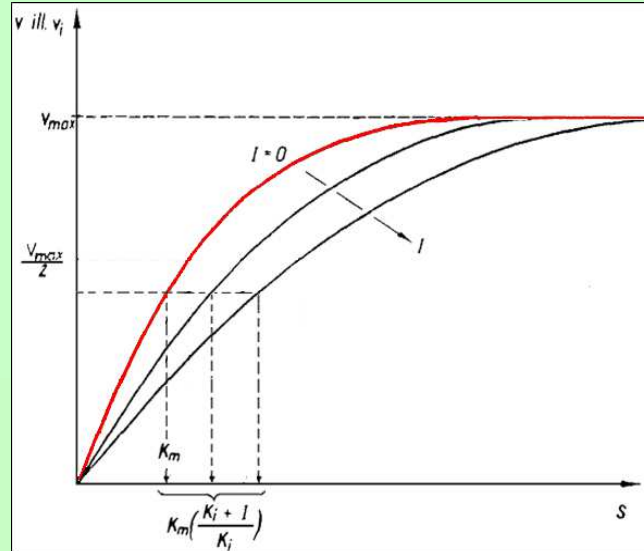
$$v_i = \frac{v_{\max}(S)}{K_s \left[\frac{K_i + (I)}{K_i} \right] + (S)}$$



A kompetitív inhibíció kinetikája

Figyeljük meg, hogy a két kinetikai paraméter (K_s , V_{max}) közül csak K_s változott, látszólag csökkent az enzim affinitása a szubsztráthoz.

V_{max} értéke nem változik, a K_m növekszik



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

17

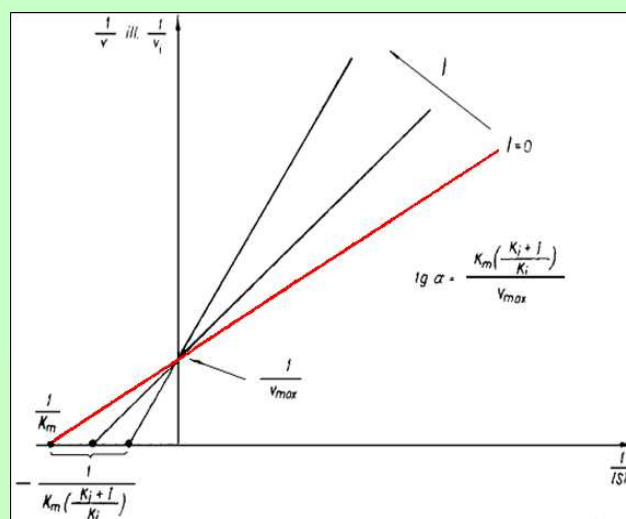
A kompetitív inhibíció kinetikája

A Lineweaver-Burk féle linearizált ábrázolásban az egyenes egyenlete:

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{V_{max}} + \frac{K_s}{V_{max}} \left(1 + \frac{I}{K_i} \right) \frac{1}{S}$$

$1/V_{max}$ értéke nem változik (közös metszéspont), az $1/K_m$ csökken. ↓

Így azonosítható a kompetitív inhibíció!

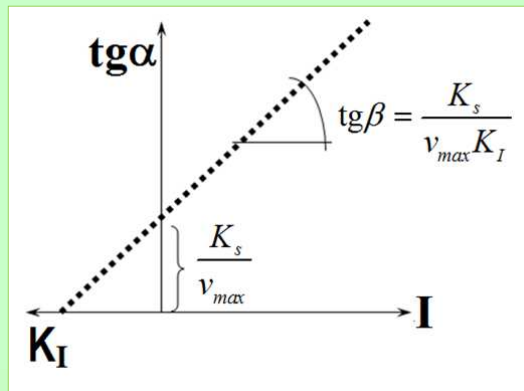


BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

18

A kompetitív inhibíció kinetikája

A Lineweaver-Burk féle linearizált egyenesekből másodlagos ábrázolással további információt kaphatunk: a meredekségeket az inhibitor koncentráció függvényében ábrázolva a tengelymetszet megadja a K_I -t.



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{K_s}{V_{\max}} \left(1 + \frac{I}{K_I} \right) = \frac{K_s}{V_{\max}} + \frac{K_s}{K_I V_{\max}} I$$



Néhány számítás

A L-B egyenes meredeksége arányos az I koncentrációval. Mekkora I duplázza meg az inhibitor nélküli L-B egyenes meredekségét?

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{K_s}{V_{\max}} \cdot 1$$

$$2 \operatorname{tg} \alpha = \frac{K_s}{V_{\max}} \left(1 + \frac{I}{K_I} \right)$$

$$2 = \left(1 + \frac{I}{K_I} \right)$$

$$I = K_I$$

Azaz $I=K_I$ esetben lesz kétszeres a meredekség.

De ez nem jelent 50%-os inhibíciót!

$v_i/v = 0,5$ kiszámítása: \rightarrow



Néhány számítás

Adott S-nél melyik az az I, amelyik 50%-os inhibíciót okoz?

$$\frac{V_i}{V} = 0,5 = \frac{\frac{S}{K_s + S}}{\frac{S}{K_s \left(1 + \frac{I}{K_I}\right) + S}}$$

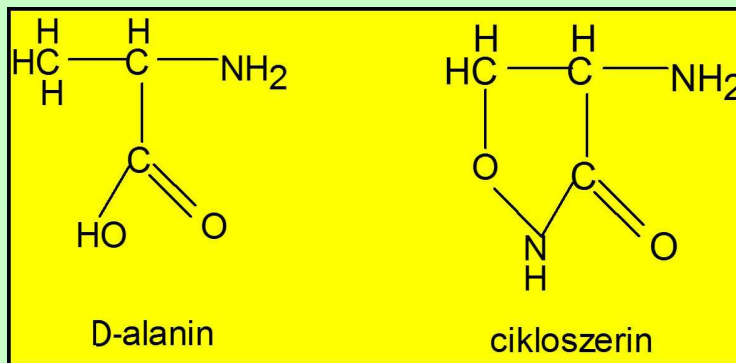
$$I = K_I \left(\frac{S}{K_s} + 1 \right)$$



Kompetitív inhibíció

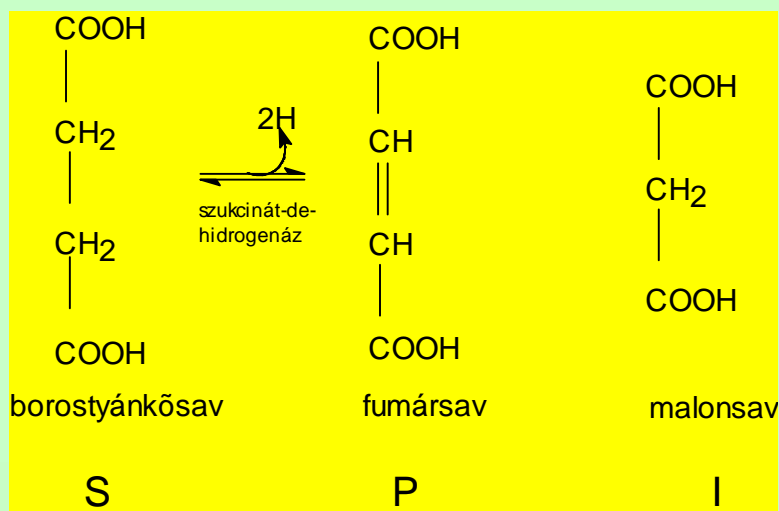
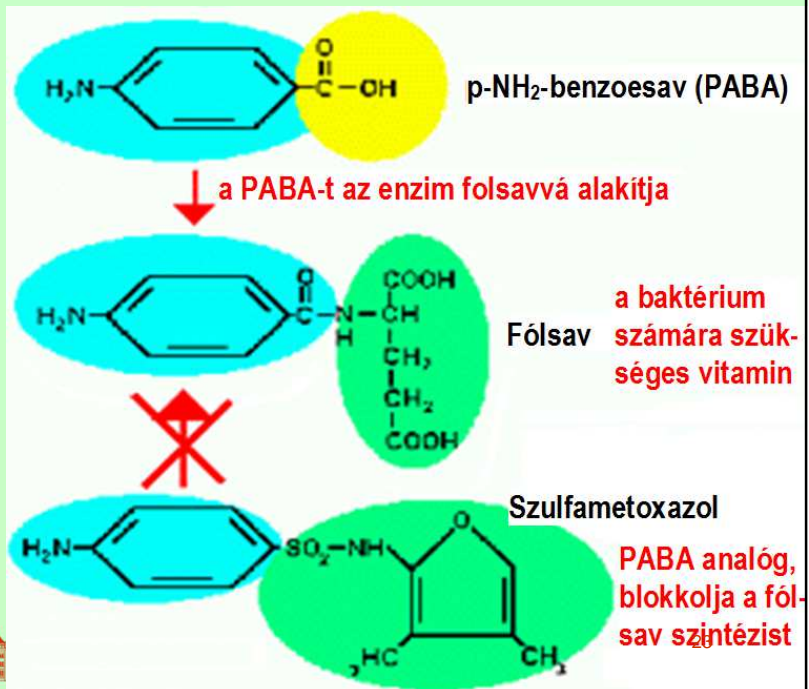
Alternatív szubsztrátok : hexokináz: glükóz,
 fruktóz

S-analógok: gyógyszerek:



Kompetitív inhibíció

Szulfonamidok
 (mikrobaellenes
 szerek) hatás-
 mechanizmusa:



Szukcinát-dehidrogenáz(1.3.99.1)

S = szukcinát

I = fumarát

$K_i = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ mmol/l}$



Analóg inhibíciók

kompetitív inhibíció:

$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s \left(1 + \frac{I}{K_i} \right) + S}$$

termék inhibíció:

$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s \left(1 + \frac{P}{K_p} \right) + S}$$

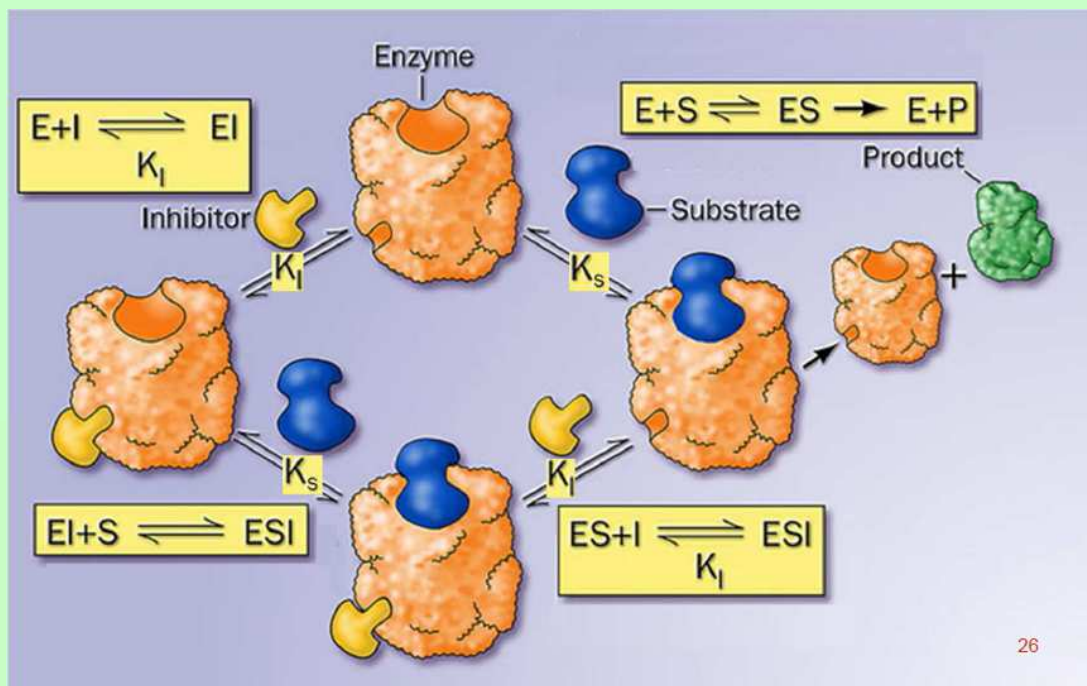
alternatív, versengő szubsztrátok esetén:

$$V_1 = V_{1\max} \frac{S_1}{K_{S1} \left(1 + \frac{S_2}{K_{S2}} \right) + S_1}$$

$$V_2 = V_{2\max} \frac{S_2}{K_{S2} \left(1 + \frac{S_1}{K_{S1}} \right) + S_2}$$



NEMKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ



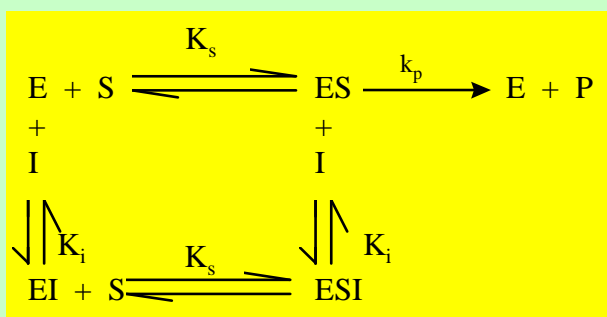
NEMKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

Az inhibitor az enzimnek egy másik kötőhelyéhez kapcsolódik és nem befolyásolja a szubsztrát kötődését – nem változtatja meg az enzimnek a szubsztráthoz való affinitását.

Csak a rapid ekvilibrium körülményei között létezik, $K_s=K_m$.



NEMKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ



$$K_s = \frac{E \cdot S}{ES} = \frac{EI \cdot S}{ESI} \quad \text{és} \quad K_i = \frac{E \cdot I}{EI} = \frac{ES \cdot I}{ESI}$$

$$V = k_p(ES)$$

$$\frac{V}{V_{\max}} = \frac{ES}{E + ES + EI + ESI}$$



NEMKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

$$\frac{v}{V_{\max}} = \frac{\frac{S}{K_s}}{1 + \frac{S}{K_s} + \frac{I}{K_i} + \frac{S \cdot I}{K_s K_i}}$$

vagy

$$\frac{v}{V_{\max}} = \frac{S}{K_s \left(1 + \frac{I}{K_i}\right) + S \left(1 + \frac{I}{K_i}\right)}$$

illetve

$$v = V_{\max} \frac{1}{\left(1 + \frac{I}{K_i}\right)} \frac{S}{K_s + S}$$

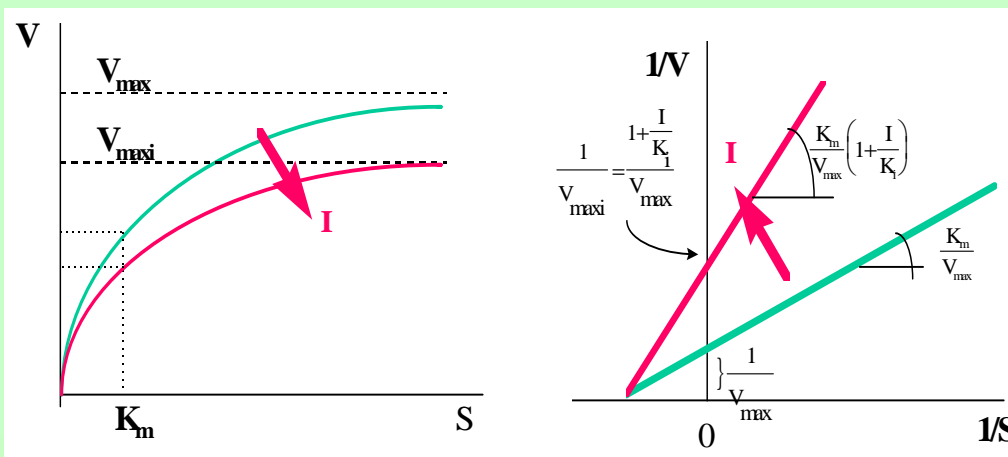
$$\frac{V}{V_{\max}} = \frac{ES}{E + ES + EI + ESI}$$

$$V = V_{\max i} \frac{S}{K_s + S} \quad \text{ahol} \quad V_{\max i} = V_{\max} \frac{1}{1 + \frac{I}{K_i}}$$

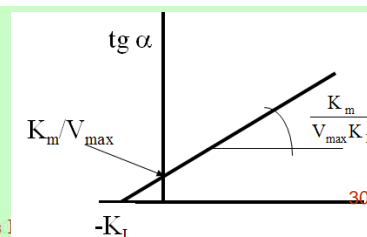
Az inhibitor a látszólagos V_{\max} értéket változtatja meg, K_s (illetve K_m) értékét nem befolyásolja.



NEMKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ



$$\text{tg } \alpha = \frac{K_m}{V_{\max}} + \frac{K_m}{V_{\max} K_i} I$$



NEMKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

Példák:

Mekkora I duplázza meg a L-B egyenes meredekségét?
Mekkora I okoz 50%-os inhibíciót?

Ugyanaz a megoldás: $\rightarrow I = K_I$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{K_S}{V_{\max}} \cdot 1 \\ 2 \operatorname{tg} \alpha &= \frac{K_S}{V_{\max}} \left(1 + \frac{I}{K_I} \right) \end{aligned}$$

Példák:

Kreatinkináz (2.7.3.2)

S= kreatin/ATP inhibitor: ADP $K_i = 2 \cdot 10^{-3}$

Fruktóz-bifoszfataz (3.1.3.11)

S=Dfr-1,6biP inhibitor: AMP $K_i = 1,1 \cdot 10^{-4}$



NEMKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

Példák:

H⁺ ionok hatása a **kimotripszin** esetében. Itt az aktív centrumban egy proton akceptor hely van, amely inhibeálható növekvő H⁺-ion koncentrációval.

(A L-B ábrázolás tiszta nemkompetitív inhibíciót mutat, azonban ne feledkezzünk meg arról, hogy a pH-nak hatása van a fehérje molekula más részeire is).

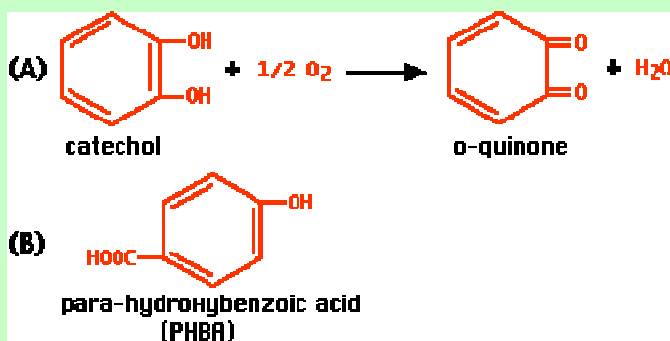
nehézfém molekulák (-SH reagensek) vagy **cianidok**.

Ezeknél azonban a hatás gyakran irreverzibilis.



NEMKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

Az almaszelet levegőn megbarnul: o-difenol-oxidáz, katechin-oxidáz:
 katechin → o-kinon



ez tovább oxidálódik barna termékekké

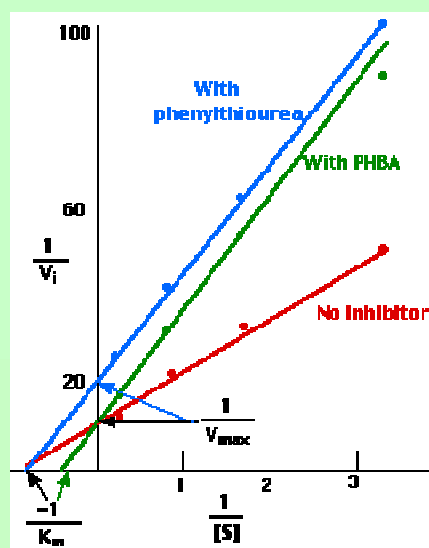
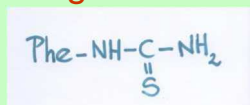
(hasonló enzim: tirozináz [tirozin](#) → [melanin](#).)



NEMKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

A katechin-oxidáz kompetitív inhibitora:
 para-hidroxi-benzoésav (PHBA),
 ugyanoda kötődik, mint a katechin.

nem-kompetitív inhibitora: feniltiourea – ez egy rézionhoz kötődik, ami szükséges az enzimműködéshez.



UNKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

$$\frac{V}{V_{\max}} = \frac{\frac{S}{K_s}}{1 + \frac{S}{K_s} + \frac{SI}{K_s K_i}}$$

$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s + S \left(1 + \frac{I}{K_i}\right)}$$

$$V = V_{\max} \frac{1}{1 + \frac{I}{K_i}} \cdot \frac{S}{K_s + S}$$

mint a nemkomp.inh.

a kompetitív fordítottja, K_s csökken

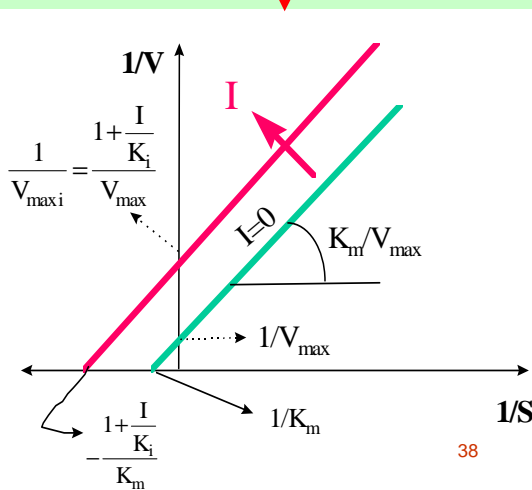
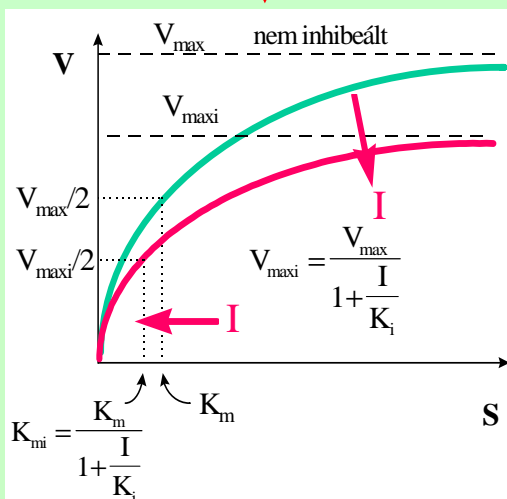
Az unkompetitív I a K_s és V_{\max} értékét ugyanolyan mértékben csökkenti



UNKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

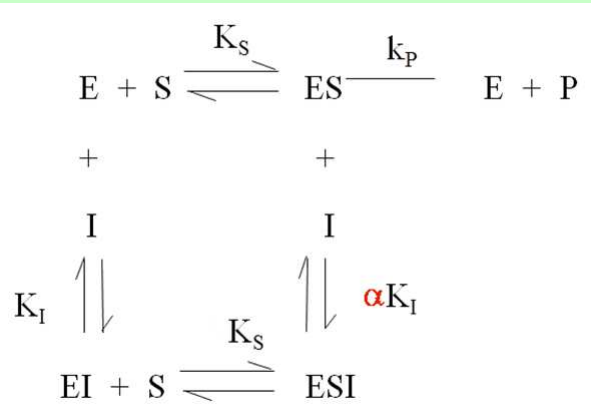
$$V = V_{\max} \frac{1}{1 + \frac{I}{K_i}} \cdot \frac{S}{\left(\frac{K_m}{1 + \frac{I}{K_i}}\right) + S}$$

$$\frac{1}{V} = \frac{K_m}{V_{\max}} \frac{1}{S} + \frac{1}{V_{\max}} \left(1 + \frac{I}{K_i}\right)$$



4. KEVERT TÍPUSÚ INHIBÍCIÓ

A kevert inhibíció sémája a nem-kompetitív inhibícióra hasonlít,



de:

az I jelenléte módosítja S-nek ES-ről történő disszociációját.



KEVERT TÍPUSÚ INHIBÍCIÓ

A kevert típusú inhibíció kinetikájának levezetése megegyezik a nem-kompetitívval, annyi eltéréssel, hogy az ESI hármas komplex koncentrációjának behelyettesítésénél bekerül az α tényező:

$$\frac{V}{V_{\max}} = \frac{\frac{S}{K_s}}{1 + \frac{S}{K_s} + \frac{I}{K_i} + \alpha \frac{S \cdot I}{K_s K_i}}$$

vagy kissé átalakítva:

$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s \left(1 + \frac{I}{K_i} \right) + S \left(1 + \frac{I}{\alpha K_i} \right)}$$



KEVERT TÍPUSÚ INHIBÍCIÓ

Vagy ha a két kinetikai paraméter változását fejezzük ki:

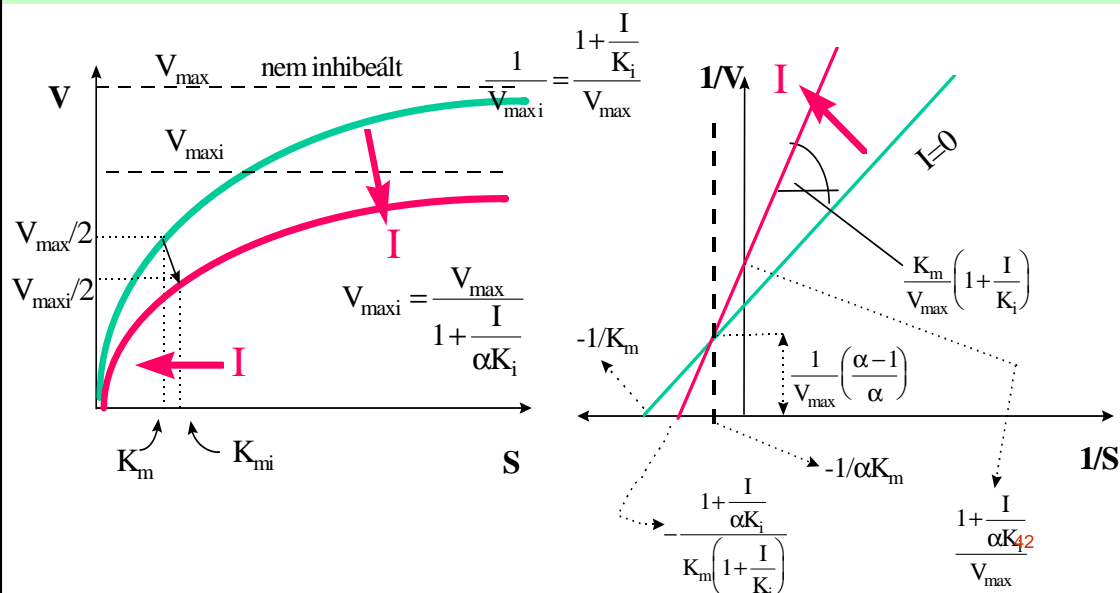
$$V = V_{\max} \frac{1}{\left(1 + \frac{I}{\alpha K_i}\right)} \cdot \frac{S}{K_s \cdot \frac{\left(1 + \frac{I}{K_i}\right)}{\left(1 + \frac{I}{\alpha K_i}\right)} + S}$$

$$V_{\max i} = V_{\max} \frac{1}{\left(1 + \frac{I}{\alpha K_i}\right)}$$

$$K_{si} = K_s \cdot \frac{\left(1 + \frac{I}{K_i}\right)}{\left(1 + \frac{I}{\alpha K_i}\right)}$$



KEVERT TÍPUSÚ INHIBÍCIÓ



KEVERT TÍPUSÚ INHIBÍCIÓ

A kevert típusú inhibícióból szinte mindegyik előbb tárgyalt levezethető a reakcióséma részeinek elhagyásával:



$\alpha < 1$ unkompetitív : ∞ kompetitív



INHIBÍCIÓK ÖSSZEFOGLALÁSA

S és I kölcsönösen kizárják egymást az enzimről

KOMPETITÍV

S és I egymástól függetlenül kötődnek az enzimre

NEMKOMPETITÍV

mint az előző, de az I megváltoztatja az enzim affinitását

KEVERT TÍPUSÚ

I csak a S után kötődik

UNKOMPETITÍV



INHIBÍCIÓK ÖSSZEFOGLALÁSA

kompetitív

$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s \left(1 + \frac{I}{K_i} \right) + S}$$

nemkompetitív

$$V = V_{\max} \frac{1}{\left(1 + \frac{I}{K_i} \right)} \cdot \frac{S}{K_s + S}$$

unkompetitív

$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s + S \left(1 + \frac{I}{K_i} \right)}$$

kevert

$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s \left(1 + \frac{I}{K_i} \right) + S \left(1 + \frac{I}{\alpha K_i} \right)}$$

$$V = V_{\max} \frac{1}{\left(1 + \frac{I}{\alpha K_i} \right)} \cdot \frac{S}{K_s \cdot \frac{\left(1 + \frac{I}{K_i} \right)}{\left(1 + \frac{I}{\alpha K_i} \right)} + S}$$

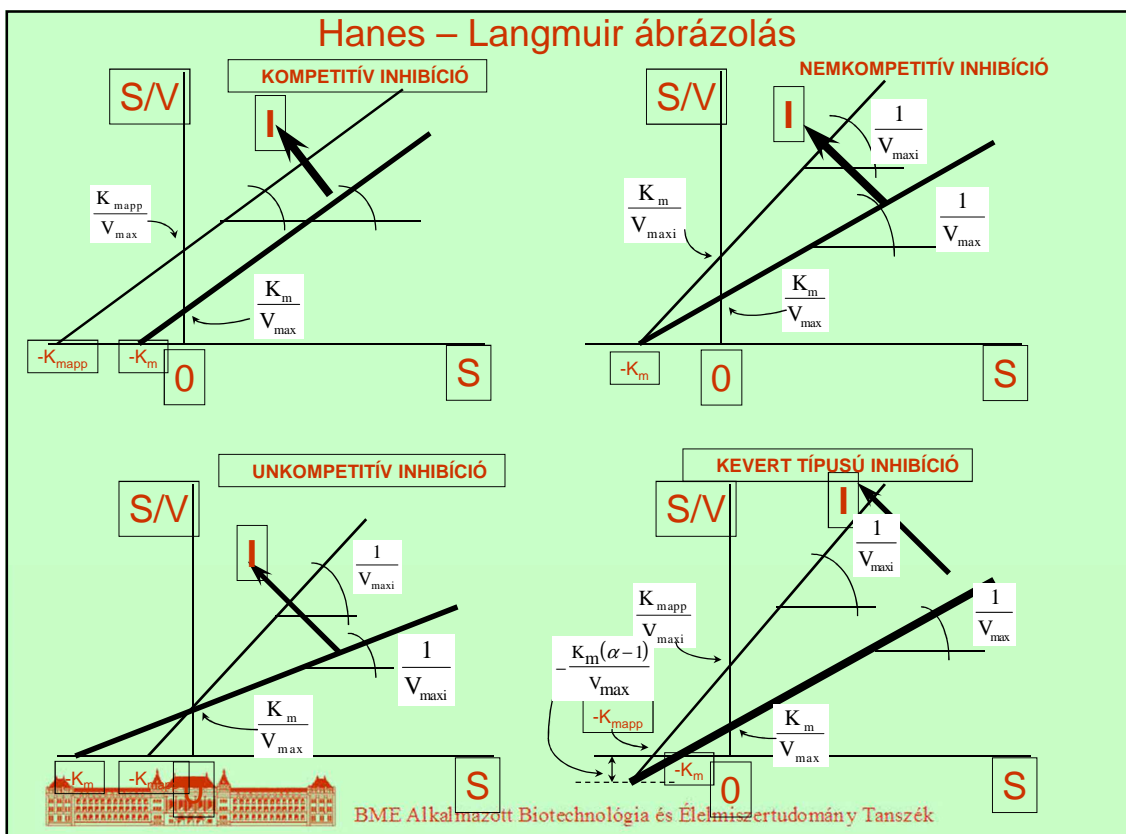
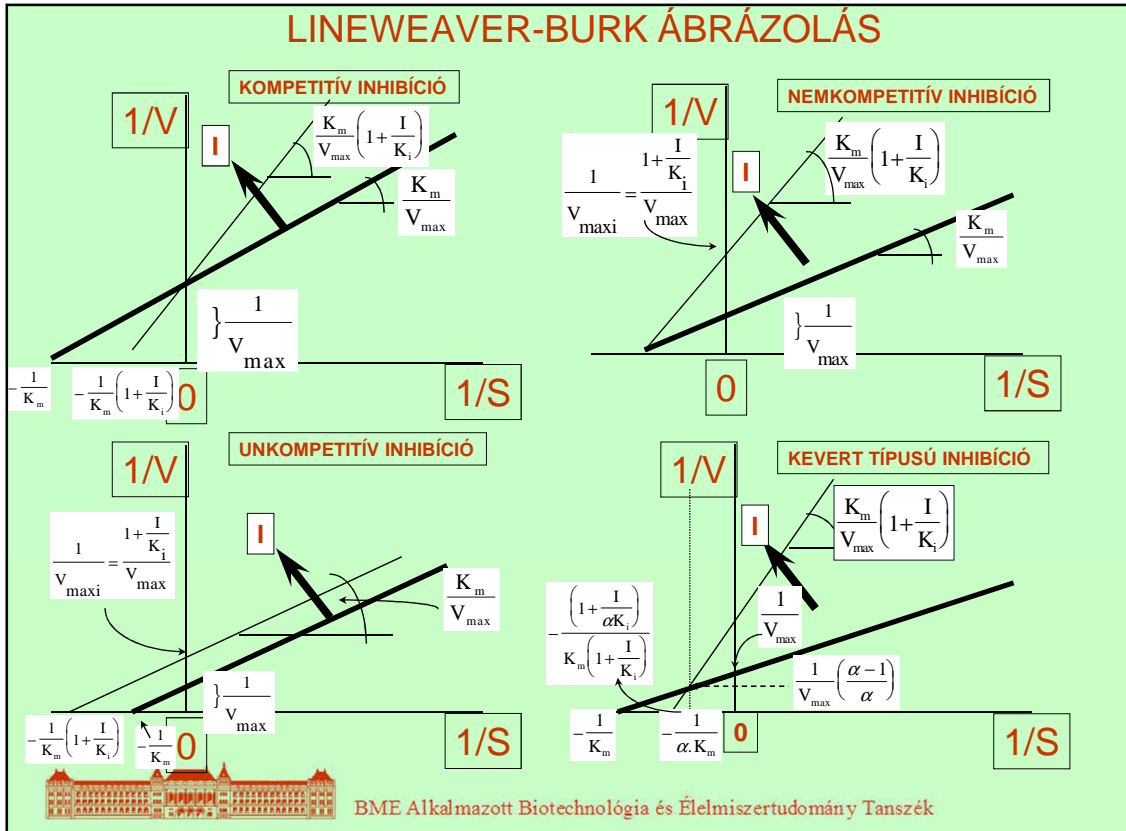
$$V = V_{\max} \frac{1}{1 + \frac{I}{K_i}} \cdot \frac{S}{\frac{K_m}{\left(1 + \frac{I}{K_i} \right)} + S}$$

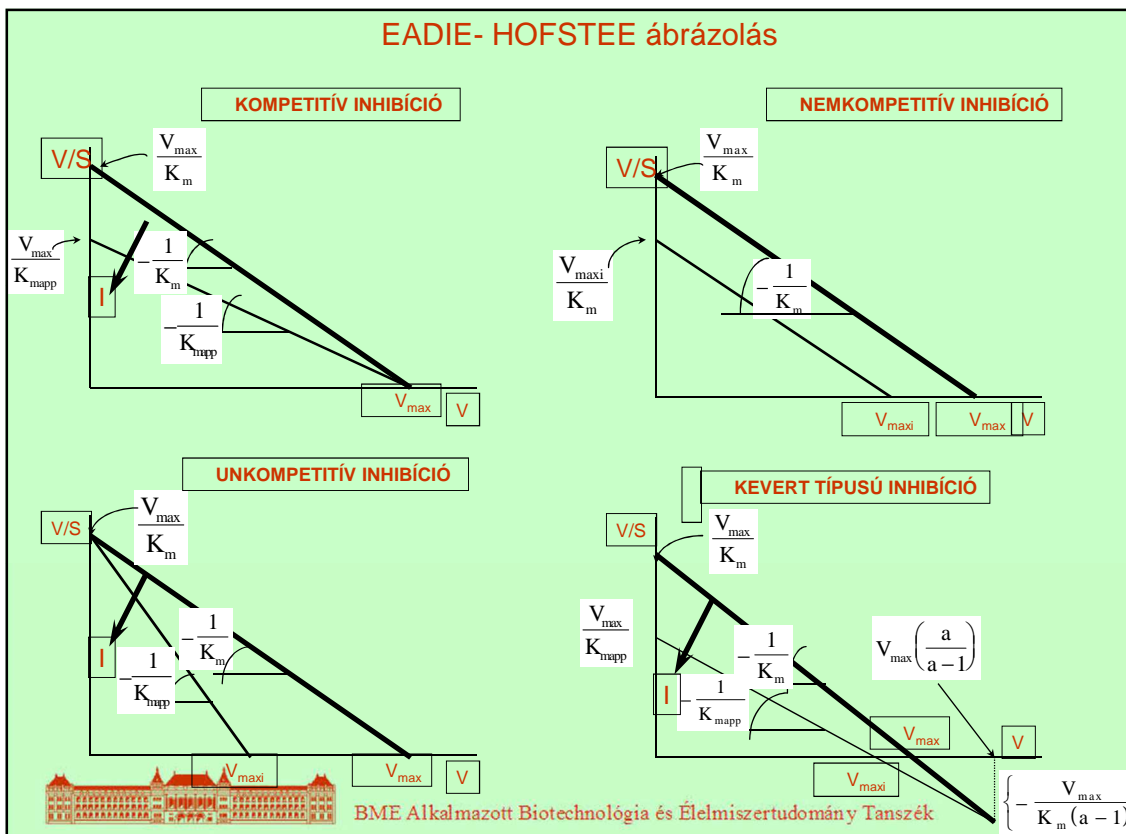


INHIBÍCIÓK ÖSSZEFOGLALÁSA

A kinetikai paraméterek (v_{\max} , K_s) meghatározásához nem szükséges az egyenletek linearizálása. Az inhibíció típusának azonosításához viszont nagy segítséget nyújt:







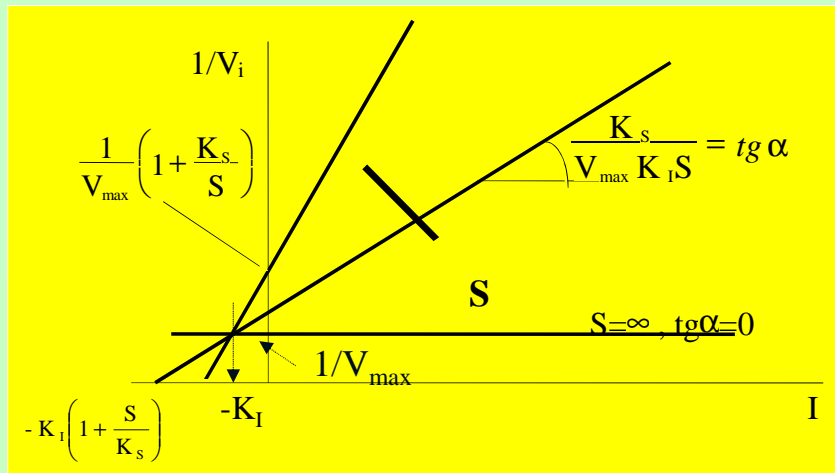
Egy újabb linearizálás: DIXON

Az inhibíciós kinetikák vizsgálatához használható az $1/v - I$ (Dixon féle) ábrázolás is. Itt azonos S értékekhez tartozó sebesség értékeket vizsgálunk. Ha ezek egyenest adnak, akkor az inhibíció lineáris. Az egyenesek elhelyezkedése segít beazonosítani az inhibíció típusát és kinetikai konstansait.



Kompetitív inhibíció:

L-B: $\frac{1}{V} = \frac{1}{V_{\max}} + \frac{K_s}{V_{\max}} \left(1 + \frac{I}{K_I}\right) \frac{1}{S}$ $\xrightarrow{\text{Dixon:}}$ $\frac{1}{V_i} = \frac{1}{V_{\max}} \left(1 + \frac{K_s}{S}\right) + \frac{K_s}{V_{\max} K_I S} I$

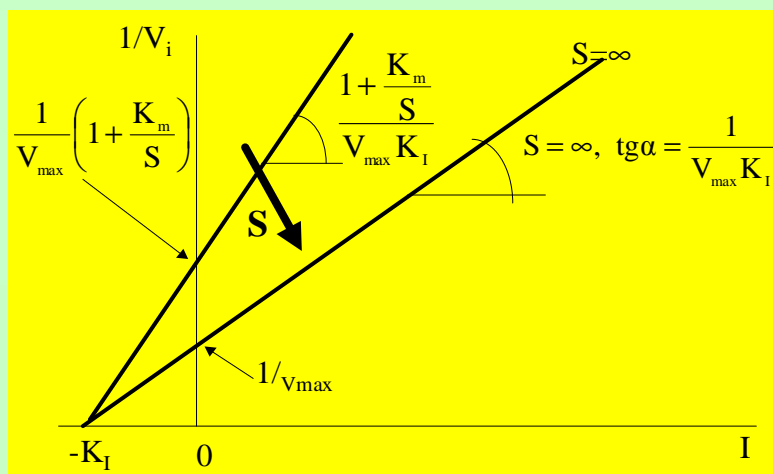


BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

51

Nemkompetitív inhibíció:

L-B: $\frac{1}{V} = \frac{K_m \left(1 + \frac{I}{K_I}\right)}{V_{\max} S} + \frac{\left(1 + \frac{I}{K_I}\right)}{V_{\max}}$ $\xrightarrow{\text{Dixon:}}$ $\frac{1}{V_i} = \frac{\left(1 + \frac{K_m}{S}\right)}{V_{\max} K_I} I + \frac{1}{V_{\max}} \left(1 + \frac{K_m}{S}\right)$

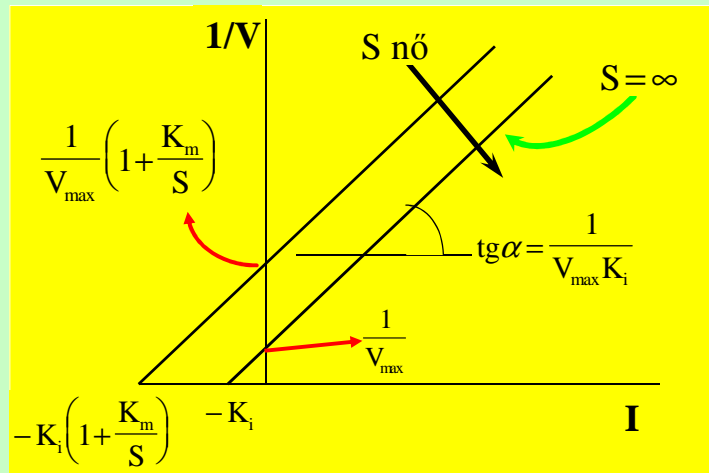


BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

52

Unkompetitív inhibíció:

L-B: $\frac{1}{V} = \frac{K_m}{V_{max}} \frac{1}{S} + \frac{1}{V_{max}} \left(1 + \frac{I}{K_i}\right)$ **Dixon:** $\frac{1}{V} = \frac{1}{V_{max} K_i} I + \frac{1}{V_{max}} \left(1 + \frac{K_m}{S}\right)$

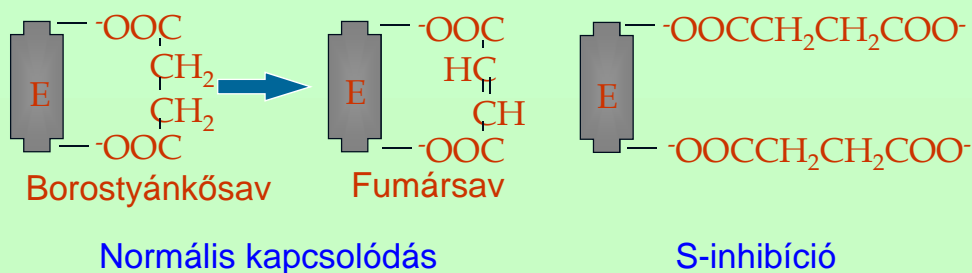


BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

SZUBSZTRÁT INHIBÍCIÓ

A szubsztrátnak ahhoz, hogy termékképző átmeneti komplex jöjjön létre, két vagy több helyen kell, hogy az enzimezhez kötődjenek.

Sok S molekula esetén egy S molekula az egyik, a másik pedig egy másik kötőhelyhez kapcsolódik, így inaktív komplexek jönnek létre (ez is reverzibilis inhibíció).



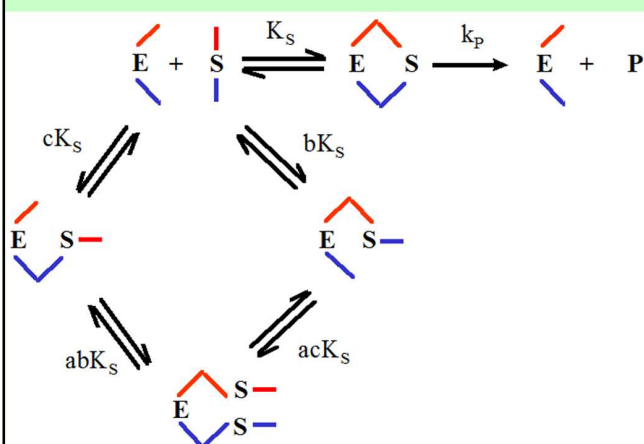
BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

SZUBSZTRÁT INHIBÍCIÓ

- Nagy S koncentrációnál egy S molekula olyan kötőhelyhez is kapcsolódhat az enzimen, amely nem az aktív centrum része, az ilyen kötődés NEMKOMPETITÍV (v. unkompetitív) módon megakadályozza a normális S kötődést.
- Az enzim működéséhez szükség lehet egy AKTIVÁTOR molekulára. Ha ez kapcsolódni képes a szubsztráttal, sok S molekula "elvonja" az enzimtől az aktivátort, így csökkentve annak tényleges aktivitását.
- Két (vagy több) szubsztrátos reakciók esetén az egyik szubsztrát feleslege lekötetheti a másik szubsztrát kötő helyeit, megakadályozva a szükséges második szubsztrát kapcsolódását, így inaktív komplexek jönnek létre.
- Nagy S koncentráció aspecifikus módon is gátolhatja a reakciót, például az ionerősség megnövekedése miatt.



SZUBSZTRÁT INHIBÍCIÓ



b és **c** – a K_s disszociációs állandó megváltozását mérő faktorok egyszeres S kötés esetén,
a - kölcsönhatási együttható

Rendszerint mindegyik > 1

$$V = V_{\max} \frac{\frac{S}{K_s}}{1 + \frac{S}{K_s} \left(1 + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right) + \left(\frac{S}{K_s} \right)^2 \frac{1}{abc}}$$

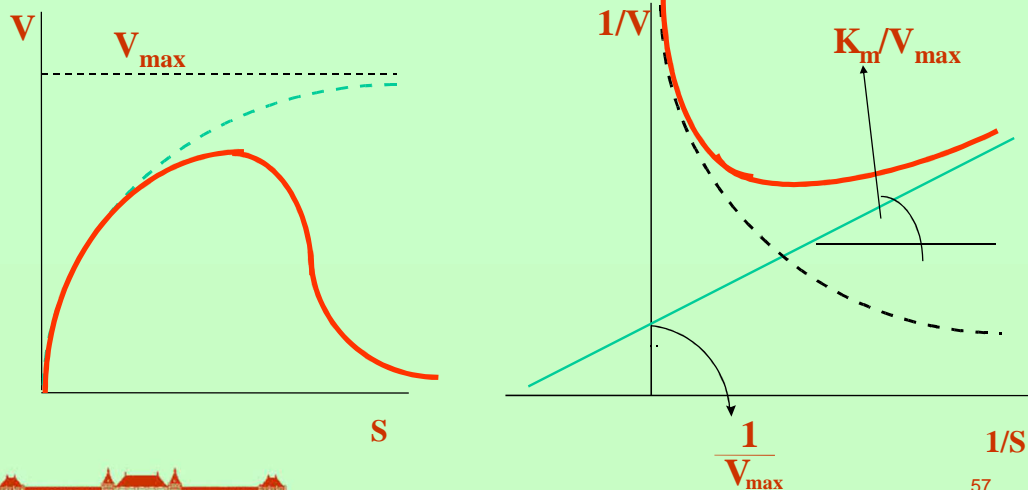
$$V = V_{\max} \frac{1}{1 + \frac{K_s}{S} + \frac{S}{a^* K_s}}$$

elhanyagolható

a^*

SZUBSZTRÁT INHIBÍCIÓ

L-B ábrázolásban egy egyenes és egy hiperbola szuperpozíciója.



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

57

SZUBSZTRÁT INHIBÍCIÓ

A szubsztrát inhibíció értelmezhető az unkompetitív inhibíció egy speciális eseteként, amikor a szubsztrát viselkedik inhibitoroként: eredeti: I helyett S:

$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s + S \left(1 + \frac{I}{K_i} \right)}$$

$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s + S + \frac{S^2}{K_i}}$$

A szubsztrát inhibícióra levezettük:

$$V = V_{\max} \frac{1}{1 + \frac{K_s}{S} + \frac{S}{a * K_s}} = V_{\max} \frac{S}{K_s + S + \frac{S^2}{K_i}}$$

Látható az analógia, $K_i = a * K_s$



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

58

SZUBSZTRÁT INHIBÍCIÓ

$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s + S + \frac{S^2}{K_i}}$$

Kis szubsztrát koncentrációknál $S/K_i \rightarrow 0$,
 ekkor visszkapjuk a M-M alakot:

$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s + S}$$

Nagy szubsztrát koncentrációknál K_s el-
 hanyagolható, így a reakciósebesség hi-
 perbolikusan csökken:

$$V = V_{\max} \frac{1}{1 + \frac{S}{K_i}}$$



SZUBSZTRÁT INHIBÍCIÓ

