

## Enzim moduláció

Enzim inhibíció és kinetikája



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

## INHIBÍCIÓ

REVERZIBILIS

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

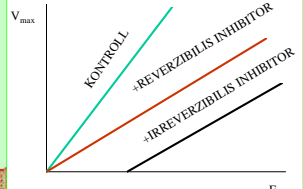

EI

IRREVERZIBILIS

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

EI

eldöntése:

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 (inhibitor, aktivátor)

A fehérje kovalens módosítása:

- foszforilezés
- glikozilálás
- proteolízis



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

## INHIBÍCIÓ

komplett, teljes

Az enzim a kötődés hatására teljesen elveszti aktivitását.

„Lineáris” inhibíció


részleges inhibíció

Az aktivitás csak csökken, egy része megmarad.

„Hiperbolikus” inhibíció →

A DIXON féle linearizált kinetikai diagramok alakjából.

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



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

## 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

$V_a$

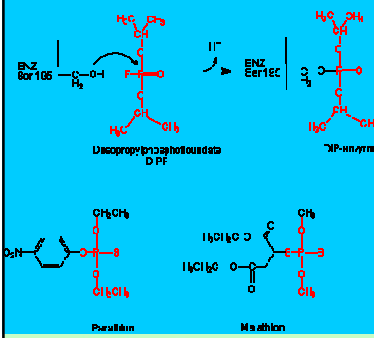
az aktiválás mértéke:

$$\mathcal{E}_a = \frac{V_a - V_0}{V_0}$$



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

## Irreverzibilis inhibitorok




Diisopropyl-foszfofluoridát  
DFP

Parathion

Malathion

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

## 1. Kompetitív inhibíció

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

I lehet:

- szubsztrát analóg
- alternatív szubsztrát
- termék

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

7

## Kompetitív inhibíció

4. MODELL: átlapolás

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

10

## Kompetitív inhibíció

2. MODELL: sztérikus gátlás A

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

8

## 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.

11

## Kompetitív inhibíció

3. MODELL: sztérikus gátlás B

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

9

## A kompetitív inhibíció kinetikája

A klasszikus kompetitív inhibíció kinetikája:

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

$$I \xrightleftharpoons{K_i} EI \xrightarrow{k_{app}} E + P'$$

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

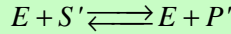
$$K_i = \frac{E \cdot I}{(EI)}$$

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

12

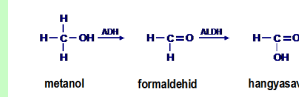
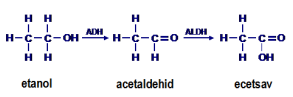
### A kompetitív inhibíció kinetikája

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



A csoportspecifikus és régióspecifikus enzimeknek értelemszerűen több alternatív szubsztrátja van.

Példa: máj enzimek: alkohol dehidrogenáz, aldehid dehidrogenáz



### 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:

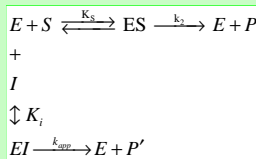
$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s \left(1 + \frac{I}{K_i}\right) + S}$$

vagy:

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

### A kompetitív inhibíció kinetikája

Analóg kinetikai levezetés:



anyagmérleg az enzimre:

$$K_s = \frac{E \cdot S}{(ES)} \quad K_i = \frac{E \cdot I}{(EI)}$$

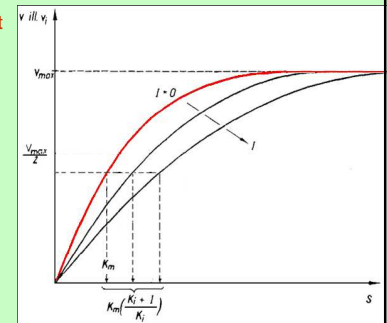
a „minket érdeklő” reakciósebesség:

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

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

### A kompetitív inhibíció kinetikája

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

### A kompetitív inhibíció kinetikája

Osszuk el a két egyenletet:  $\frac{V}{E_0} = \frac{k_2(ES)}{E + (ES) + (EI)}$

Helyettesítsük be:

$$\frac{V}{E_0} = \frac{k_2 E \frac{S}{K_s}}{E + E \frac{S}{K_s} + E \frac{I}{K_i}} \rightarrow \frac{V}{k_2 E_0} = \frac{\frac{S}{K_s}}{1 + \frac{S}{K_s} + \frac{I}{K_i}}$$

$V_{\max} = k_2 E_0$

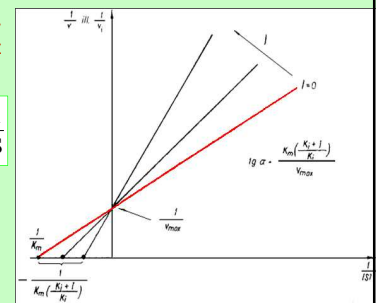
### A kompetitív inhibíció kinetikája

A Lineweaver-Burk féle linearizált ábrázolásban az egyenes egyenlete:

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

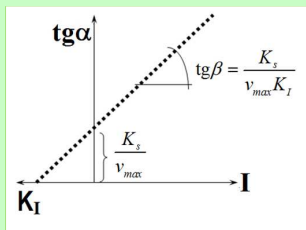
$1/V_{\max}$  értéke nem változik (közös metszéspont), az  $1/K_m$  csökken.

Így azonosítható a kompetitív inhibíció!



### 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.

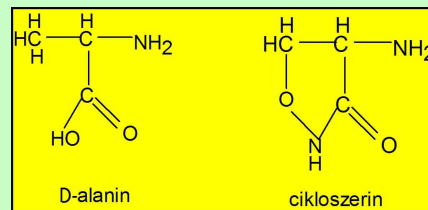


$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{K_s}{V_{\max}} \left( 1 + \frac{I}{K_I} \right) = \frac{K_s}{V_{\max}} + \frac{K_s}{K_I V_{\max}} I$$

### Kompetitív inhibíció

Alternatív szubsztrátok : hexokináz: glükóz, fruktóz

S-analógok: gyógyszerek:



### Néhány számítás

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

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

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

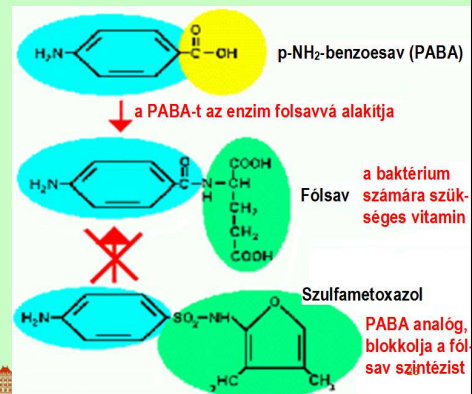
$$2 = \left( 1 + \frac{I}{K_I} \right)$$

$$I = K_I$$

Azaz  $I=K_I$  esetben lesz kétszeres a meredekség. De ez nem jelent 50%-os inhibíciót!  
 $v_i/v = 0,5$  kiszámítása: →

### Kompetitív inhibíció

Szulfonamidok (mikrobaellenes szerek) hatásmechanizmusa:

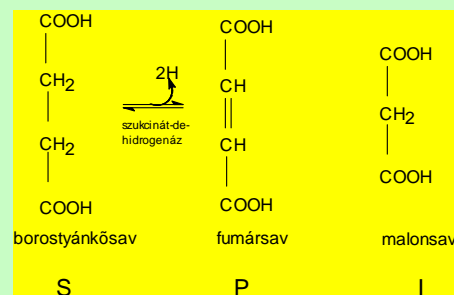


### Néhány számítás

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

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

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



Szukcinát-dehidrogenáz(1.3.99.1)

S = szukcinát

I = fumarát

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

### Analóg inhibíciók

kompetitív inhibíció:

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

termék inhibíció:

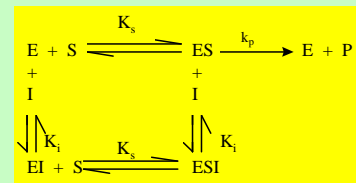
$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s \left(1 + \frac{P}{K_p}\right) + S}$$

alternatív, versengő szubsztátok 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

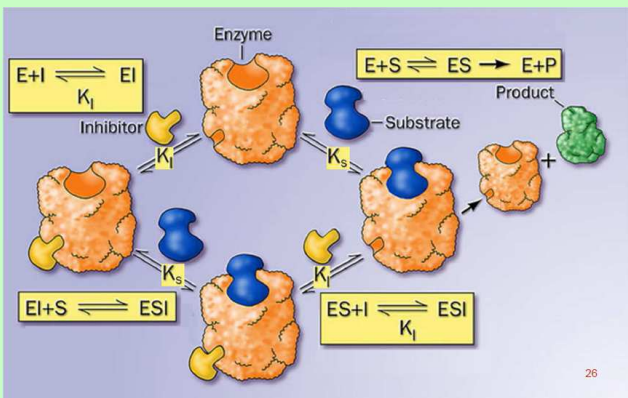


$$K_s = \frac{E \cdot S}{ES} = \frac{EI \cdot S}{ESI} \quad \text{és} \quad K_i = \frac{E \cdot I}{EI} = \frac{ES \cdot I}{ESI}$$

$$V = k_p(ES)$$

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

### NEMKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ



### NEMKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

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

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

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

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

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

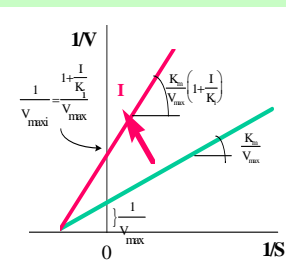
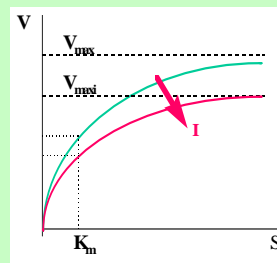
Az inhibitor a látszólagos  $V_{\max}$  értéket változtatja meg,  $K_s$  (illetve  $K_m$ ) értékét nem befolyásolja.

### NEMKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

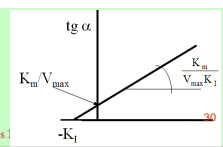
Az inhibitor az enzimnek egy másik kötéshelyéhez kapcsolódik és nem befolyásolja a szubsztát kötődését – nem változtatja meg az enzimnek a szubsztáthoz való affinitását.

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

### 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:  $\rightarrow I = K_I$


$$tg\alpha = \frac{K_S}{V_{max}} \cdot I$$

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

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     $K_I = 1,1 \cdot 10^{-4}$



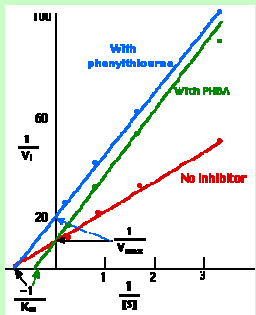

31

### 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 enziműködéshez.

Ph-NH-C(=S)-NH2

34

### NEMKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

Példák:

**H<sup>+</sup> ionok hatása a kimotripszin esetében.** Itt az aktív centrumban egy proton akceptor hely van, amely inhiheálható növekvő H<sup>+</sup>-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).

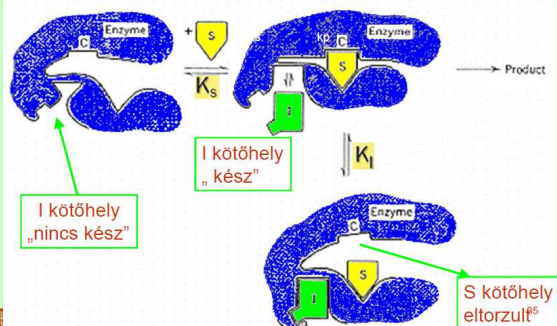

**nehézfém** molekulák (-SH reagensek) vagy **cianidok**. Ezeknél azonban a hatás gyakran irreverzibilis.



32

### UNKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

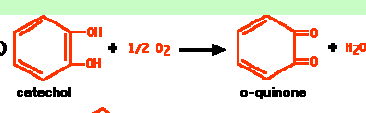
I csak a már létrejött ES komplexhez kötődik.

### NEMKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

Az almazelet levegőn megbarnul: o-difenol-oxidáz, katechin-oxidáz: katechin  $\rightarrow$  o-kinon

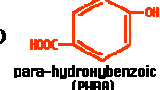
(A)



catechol                      o-quinone


ez tovább oxidálódik barna termékekké

(B)



para-hidroxibenzoic acid (PHBA)

(hasonló enzim: tirozináz    tirozin  $\rightarrow$  melanin.)



33

### UNKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

I csak a már létrejött ES komplexhez kötődik


$$E + S \xrightleftharpoons{K_S} ES \xrightarrow{k_{p2}} E + P$$

$$ES + I \xrightleftharpoons{K_I} ESI \xrightarrow{\times} P$$

$v = kp(ES)$

$K_S = \frac{E \cdot S}{ES}$  és  $K_I = \frac{ES \cdot I}{ESI}$

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



36

### UNKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

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

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

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

mint a nemkomp.inh. a kompetitív fordítottja,  $K_s$  csökken

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

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék 37

### KEVERT TÍPUSÚ INHIBÍCIÓ

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

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

vagy kissé átalakítva:

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

BME 40

### UNKOMPETITÍV INHIBÍCIÓ

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

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

nem inhebeált

$V_{maxi} = \frac{V_{max}}{1 + \frac{I}{K_i}}$

$K_{mi} = \frac{K_m}{1 + \frac{I}{K_i}}$

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

$\frac{1}{K_{mi}} = \frac{1}{K_m} \left(1 + \frac{I}{K_i}\right)$

38

### KEVERT TÍPUSÚ INHIBÍCIÓ

Vagy ha a két kinetikai paraméter változását fejezzük ki:

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

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

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

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék 41

### 4. KEVERT TÍPUSÚ INHIBÍCIÓ

A kevert inhibíció sémája a nem-kompetitív inhibícióra hasonlít,

$$\begin{array}{c}
 E + S \xrightleftharpoons{K_s} ES \xrightarrow{k_p} E + P \\
 + \quad \quad \quad + \\
 I \quad \quad \quad I \\
 K_i \downarrow \quad \quad \downarrow \alpha K_i \\
 EI + S \xrightleftharpoons{K_s} ESI
 \end{array}$$

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

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék 39

### KEVERT TÍPUSÚ INHIBÍCIÓ

nem inhebeált

$V_{maxi} = \frac{V_{max}}{1 + \frac{I}{\alpha K_i}}$

$K_{mi} = \frac{K_m}{1 + \frac{I}{\alpha K_i}}$

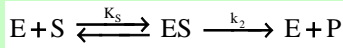
$\frac{1}{V_{maxi}} = \frac{1}{V_{max}} \left(1 + \frac{I}{\alpha K_i}\right)$

$\frac{1}{K_{mi}} = \frac{1}{K_m} \left(1 + \frac{I}{\alpha K_i}\right)$

42

### KEVERT TÍPUSÚ INHIBÍCIÓ

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



$\alpha < 1$  unkompetitív :  $\infty$  kompetitív



### INHIBÍCIÓK ÖSSZEFOGLALÁSA

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



### 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

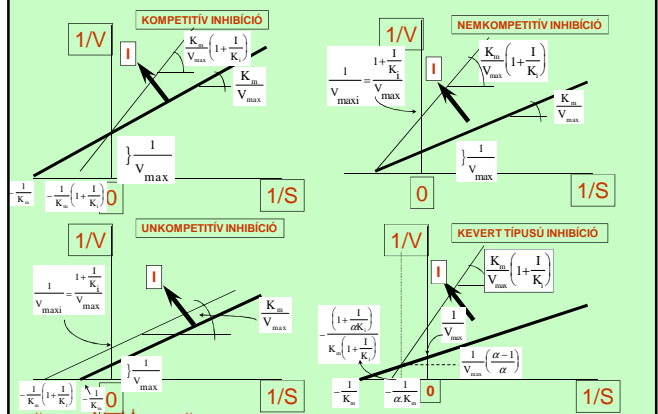
**KEVERT TÍPUSÚ**

I csak a S után kötődik

**UNKOMPETITÍV**



### LINEWEAVER-BURK ÁBRÁZOLÁS



### 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**

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

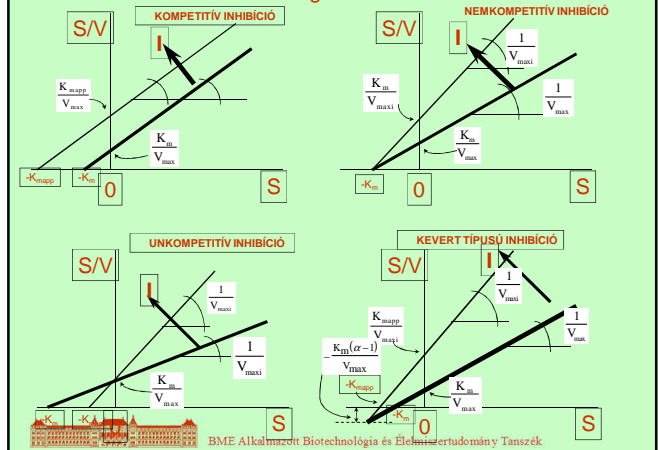
**kevert**

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

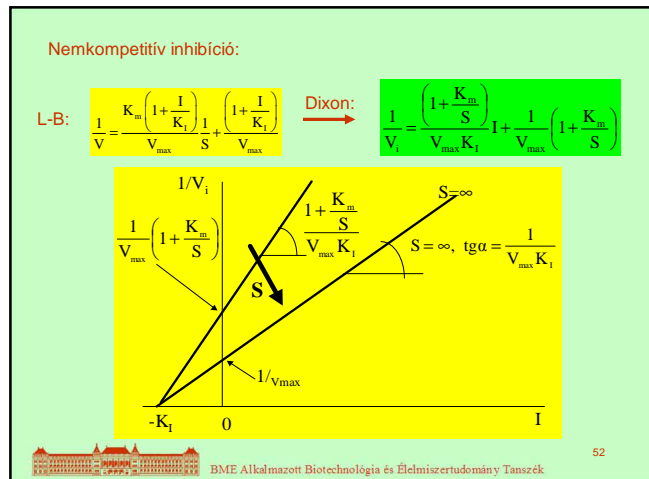
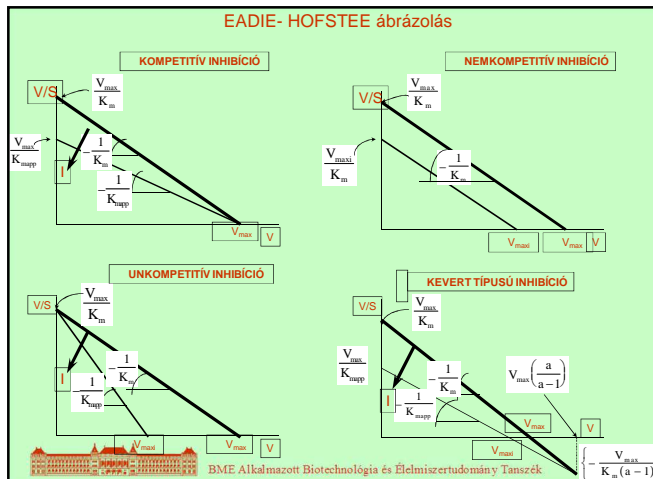
$$V = V_{max} \frac{1}{\left(1 + \frac{I}{\alpha K_i}\right)} \cdot \frac{S}{K_s \left(1 + \frac{I}{K_i}\right) + S}$$



### Hanes – Langmuir ábrázolás



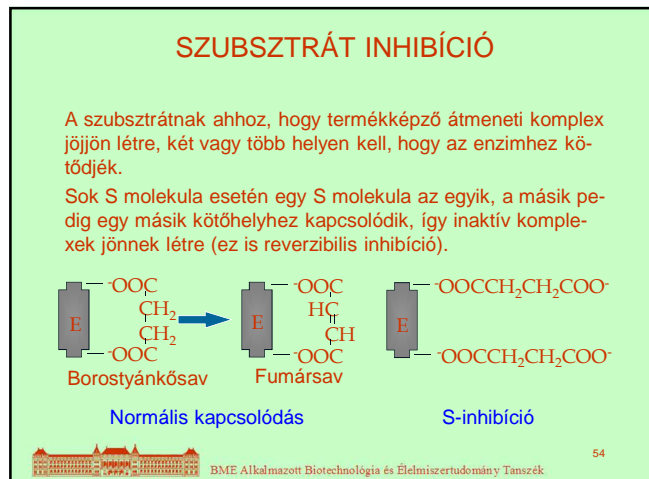
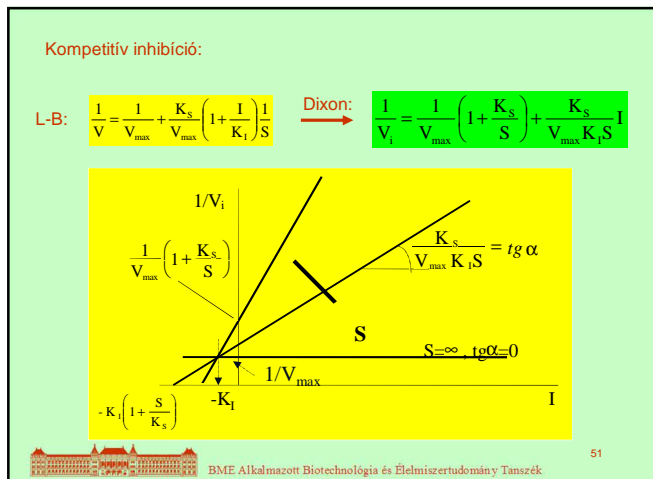
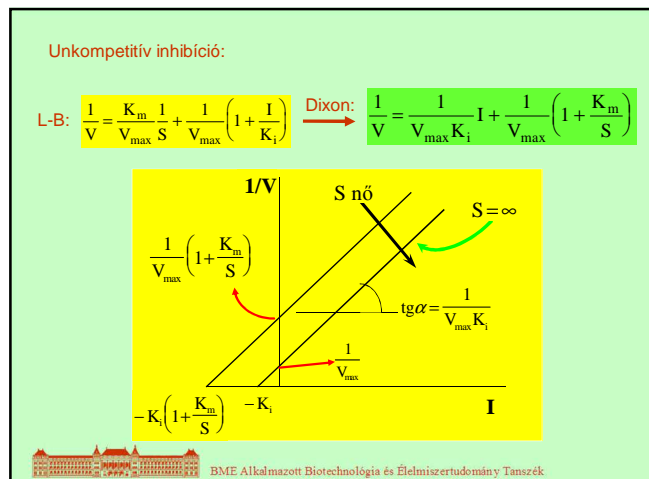




**Egy újabb linearizálás: DIXON**

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.

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

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

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

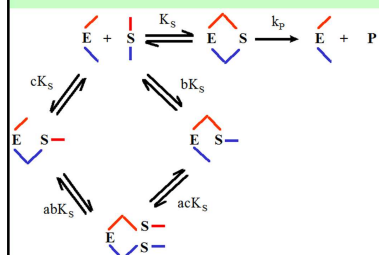
$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s + S + \frac{S^2}{K_i}}$$

A szubsztrát inhibícióra levezettük:

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

Látható az analógia,  $K_i = a \cdot K_s$

### SZUBSZTRÁT INHIBÍCIÓ



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

Rendszerint mindegyik > 1

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

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

elhanyagolható

$a^*$

### SZUBSZTRÁT INHIBÍCIÓ

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

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

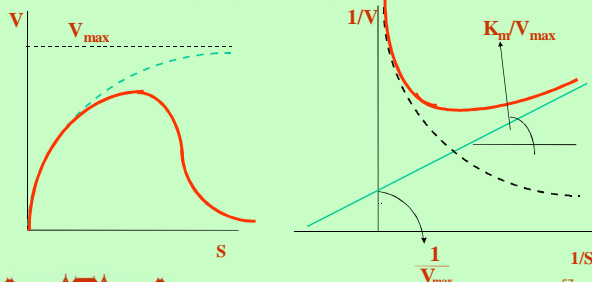
$$V = V_{\max} \frac{S}{K_s + S}$$

Nagy szubsztrát koncentrációknál  $K_s$  elhanyagolható, így a reakciósebesség hiperbolikusan csökken:

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

### SZUBSZTRÁT INHIBÍCIÓ

L-B ábrázolásban egy egyenes és egy hiperbola szuperpozíciója.



### SZUBSZTRÁT INHIBÍCIÓ

