4181 Anaerobik Arıtma Sistemlerinde Proses Tasarımı

10. Ders

AKTİVASYON ENERJİSİ

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi
Çevre Müh. Böl.
Çağış/Balıkesir

agunay@balikesir.edu.tr
ahmetgunay2@gmail.com
+90 505 529 43 17

http://cevre.balikesir.edu.tr/index.php/doc-dr-ahmet-gunay-ders-notlari/anaerobik-aritma-sistemleri-proses-tasarimi/

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

AKTİVASYON ENERJİSİ

Anaerobik proseslerde aktivasyon enerjisi
Anaerobik arıtmada sıcaklığın biyokimyasal reaksiyon hızına etkisi
(Reaksiyon hızlarının sıcaklığa bağımlılığı)
Sıcaklık düzeltme katsayısı
Mutlak sıcaklık

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak. Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Aktivasyon Enerjisi

Aktivasyon enerjisi (Ea): Bir prosesin ya da reaksiyonun başlaması için gerekli olan minimum enerjidir. Başka bir ifade ile, reaksiyonun gerçekleşmesi için aşılması gereken **bariyer enerjidir**.

- Bir reaksiyonun aktivasyon enerjisi yüksek ise, reaksiyonun hızı düşüktür.
- Katalizörler aktivasyon enerjisini düşürürler ve reaksiyonlarda katalizörlerin mevcut olması halinde reaksiyonun hızı artar.
- Biyolojik sistemlerde enzimler katalizör olarak yer alırlar ve biyokimyasal reaksiyonu katalizleyerek reaksiyonunun hızını arıtırlar. Enzimler, substrat bileşenlerine bağlanarak katalizledikleri biyokimyasal reaksiyonun aktivasyon enerjisini düşürürler ve biyokimyasal reaksiyonunu hızlandırırlar.

Arrhenius equation. Explains the relationship between the rate constant of a reaction, *k*, and the activation energy, *E*a:

$$k = A \times \text{üs}(-E_a/RT)$$

$$E_a = \frac{RT_2T_1}{T_2 - T_1} \ln \frac{k_2}{k_1}$$

$$R = 8,314\ J\ /\ mol - K$$

where k_2 and k_1 are the **specific reaction rate constants** at two different **absolute temperatures**, T_2 and T_1, respectively. The effect of temperature on the rate of reaction is frequently expressed in terms of a temperature coefficient, Q_{10}, which is the factor by which the rate of reaction increases when the temperature is raised by 10°C

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Aktivasyon Enerjisi

Reaksiyon hızı: aktivasyon enerjisinin belirlenmesinde en önemli hususlar **reaksiyon hızının nasıl ölçüleceği** ve **reaksiyonla uyumlu modellerin belirlenmesi**dir. Reaksiyon hızı, reaksiyona giren (azalan) bileşenler cinsinden ölçülebileceği gibi, ürünler cinsinden de belirlenebilir. Çevre mühendisliği uygulamalarında reaksiyon hızlarını reaksiyona giren KOİ cinsinden belirlemek daha yaygındır.

Reaksiyonun parametresi: Reaksiyon hızını ölçmek üzere seçilen parametre belirlenirken, değişime uğrayan bileşenin reaksiyonun amaçları ile uyumlu olması (KOİ giderimi, CH_4 ya da alkol üretimi gibi) ve ölçümün doğru şekilde yapılabilmesi hususları esas alınır. Mesela aerobik veya anaerobik bir biyokimyasal reksiyonda giderilen KOİ/TOK/UKM/$BOİ_5$ parametrelerinden biri veya birkaçı ölçülebileceği gibi, açığa çıkan CO_2 veya CH_4 da prosesin performansını takip etmek için ölçülebilir. Diğer taraftan aerobik proseslerde CO_2 ölçümü pratik olmadığından prosesin performansı azalan sübstrat cinsinden belirlenir.

Sıcaklık: Sıcaklık arttıkça moleküllerin çarpışması arttığından reaksiyonun gerçekleşmesi (reaktantların ürünlere dönüşümü) daha hızlıdır. **Artan sıcaklık moleküler çarpışmayı artırdığından reaksiyon hızını artırır**. Reaksiyonun hız sabiti sıcaklığa bağımlıdır. Hız sabitinin değeri aktivasyon enerjisine bağlıdır. **Yüksek aktivasyon enerjisi reaksiyon hızını düşürür**.

Katalizörler: Katalizörler reaksiyonların aktivasyon enerjilerini düşürdüklerinden reaksiyonların hızlarını artırırlar.

Enzimler: Enzimler biyo-reaksiyonlarda etkili katalizörlerdir. Enzimler biyo-reaksiyonun gerçekleşmesinde alternatif yol sağlayarak reaksiyon hızını artırır. Enzimler reaktant ile temas kurduktan sonra reaksiyon hızla gerçekleşir ve boşta kalan enzim başka reaksiyonda tekrar katalizör olarak reaksiyona girebilir. Enzim konsantrasyonu reaksiyon hızını artırır mı?

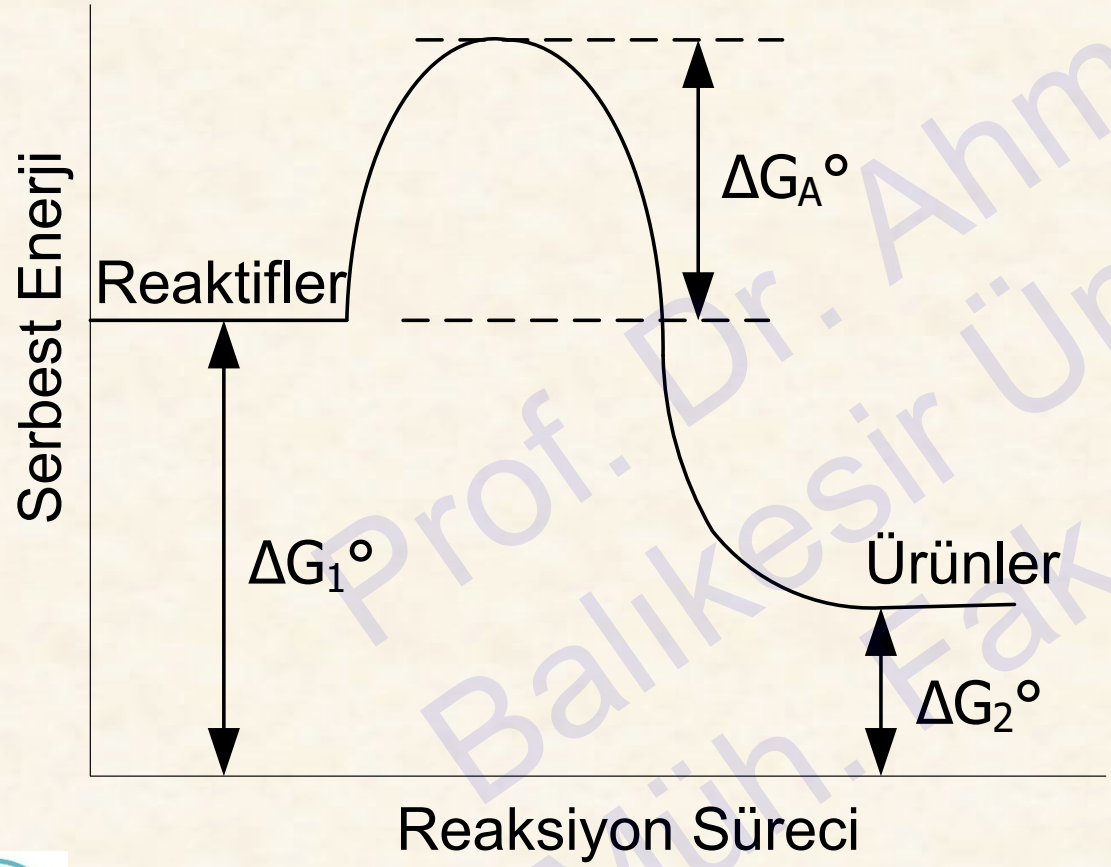
Çarpışma: Çarpışma enerjisi aktivasyon enerjisine eşit olduğunda ya geçtiğinde reaksiyon gerçekleşir.

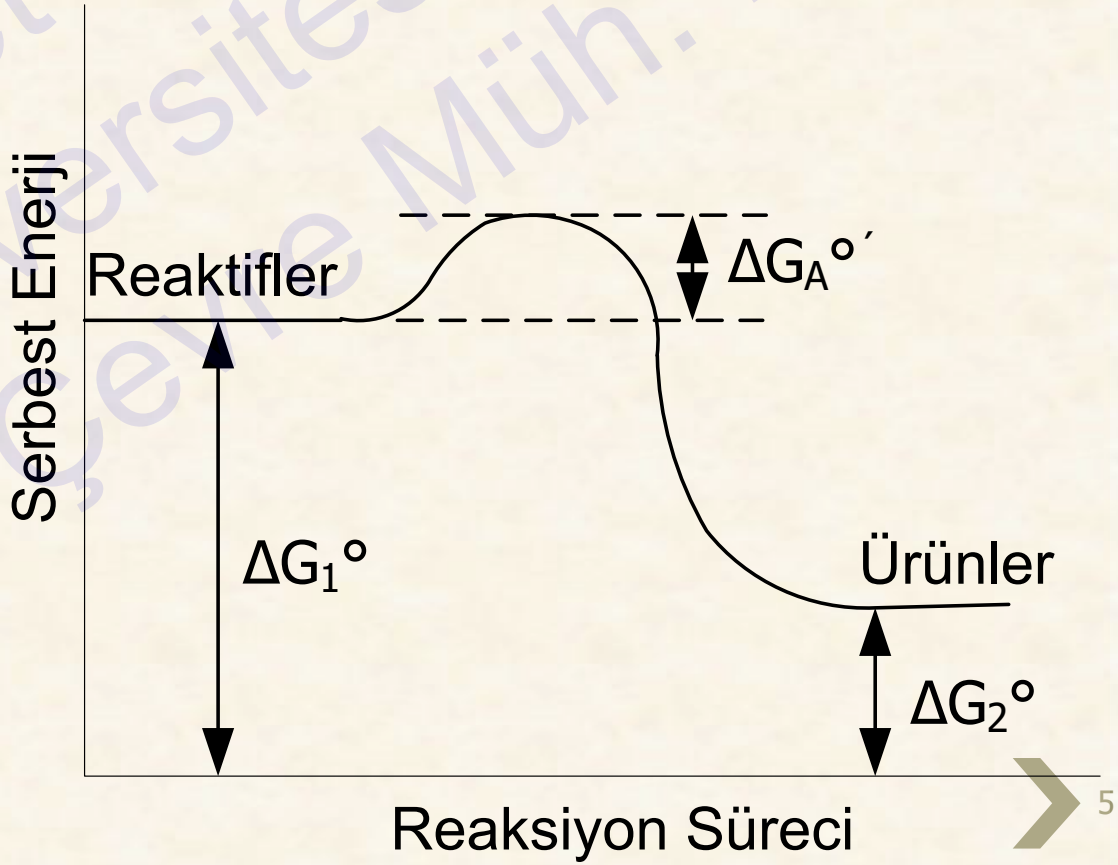
Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak. Çevre Müh. Böl.

Aktivasyon Enerjisi

Su ortamlarındaki ya da çözeltilerdeki moleküllerin hareketi, aynı doğrultuda düz şekilde, dönme ya da titreşim şeklinde olabilir. Bu hareketler sebebiyle, moleküllerin düzenli şekilde çarpışarak reaksiyona girmeleri zorlaşır. Bu düzensiz hareketlerin reaksiyon hızına etkileri Arhenius eşitliğindeki frekans faktörü **(A)** (pre-exponential factor) ile ifade edilir. Odunu tutuşturmak için niçin çıra kullanılır? Ya da KOİ deneyinde niçin konsantre H_2SO_4'e niçin $AgSO_4$ ilave edilir ve ısıtılır?





Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Aktivasyon Enerjisi

Her organizma için optimum bir sıcaklık aralığı vardır. **Optimum sıcaklığa kadar büyüme hızı (çoğalma hızı) her 10 ^{o}C sıcaklık arıtışı için iki kat artar.** Optimum sıcaklığın üzerinde, büyüme hızı sıcaklık artışıyla düşer ve ölüm görülebilir. Mikrobiyal çoğalmanın ya da ölümün sıcaklıkla değişimi Arrhenius eşitliği ile ifade edilir.

$$Mikrobiyal\ çoğalma;\ \mu = A \times üs(-E_a / RT)$$

$$İçsel\ \ solunum;\ k_d = A' \times üs(-E_d / RT)$$

Bu eşitliklerde μ ve k_d sırasıyla, büyüme ve içsel solunum (ölüm) hızlarını göstermektedir. Büyüme için E_a 10-20 kcal/ mol iken, içsel solunum için E_d 60-80 kcal/mol civarındadır. Buna göre, içsel solunum sıcaklıktan daha fazla etkilenmektedir.

Reaksiyon hızı genel olarak "*k*" ile ifade edilirse;

$$k = A \times üs(-E_a / RT)$$

$$Lineerleştirilmiş\ \ eşitlik;$$

$$\ln k = \underset{a}{\ln A} + \underbrace{\left(\frac{-Ea}{R}\right)}_{b} \times \underbrace{\left(\frac{1}{T}\right)}_{\chi}$$

$$Y = a + b\,\chi$$

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Aktivasyon Enerjisi

Reaksiyonların aktivasyon enerjisi, farklı sıcaklıklarda reaksiyonun hızı ölçülerek hesaplanabilir. Apsiste **(1/*T*)** ve ordinatta **ln *k*** olacak şekilde bir eksen takımına deney sonuçları işaretlendiğinde bir doğru elde edilecek ve doğrunun eğimi, ($-E_a$/R) ve intersepti (kesme noktası) ln*A* olacaktır.

Reaksiyonların hızlarını karakterize eden katsayıların sıcaklığa bağımlılığı aktivasyon enerjisinin büyüklüğüne bağlıdır. **Aktivasyon enerjisi biyo-reaksiyonlarda 4-125 kJ/mol (1-30 kcal/mol) arasında değişir.**

ÖRNEK-1

Bir reaksiyonda **10 ^{o}C'lik sıcaklık artışı** için reaksiyon hızı iki katına çıkmaktadır. Buna göre aktivasyon enerjisini hesaplayınız. Başlangıç sıcaklığı **25 ^{o}C**'dir.

ÇÖZÜM

1. Hız ifadesi;

$$k = A \times üs(-E_a / RT)$$

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT}$$

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

ÇÖZÜM (devamı)

2. T_1 ve T_2 sıcaklıklarına tekabül eden reaksiyon hızları k_{T1} ve k_{T2} olsun.

a) T_1 sıcaklığı için;

$$\ln k_{T1} = \ln A - \frac{E_a}{R \times T_1}$$

b) T_2 sıcaklığı için;

$$\ln k_{T2} = \ln A - \frac{E_a}{R \times T_2}$$

3. İki denklemin çözümü;

$$\ln k_{T1} = \ln A - \frac{E_a}{R \times T_1}$$

$$-\ln k_{T2} = -\ln A + \frac{E_a}{R \times T_2}$$

$$\ln k_{T1} - \ln k_{T2} = \frac{E_a}{R \times T_2} - \frac{E_a}{R \times T_1}$$

$$\ln \frac{k_{T1}}{k_{T2}} = \frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

$$\Rightarrow \quad E_a = \frac{R T_2 T_1}{T_2 - T_1} \ln \frac{k_{T1}}{k_{T2}}$$

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak. Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

ÇÖZÜM (devamı)

4. Bilinen verilere göre E_a'nın çözümü;

- $T_1 = (273+25) = 298\,K$
- $T_2 = (273+25+10) = 308\,K$
- $k_{T2} = 2 \times k_{T1}$

$$E_a = \frac{R\left(\ln \frac{k_{T1}}{k_{T2}}\right)}{1/T_2 - 1/T_1}$$

$$E_a = \frac{8.3144\times10^{-3}\,kJ/mol\cdot K \times \ln\left(\frac{k_{T1}}{2\times k_{T1}}\right)}{\left(\frac{1}{308}-\frac{1}{298}\right)K^{-1}}$$

$$= 52.90\,kJ/mol\ (12.63\,kcal/mol)$$

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}\right)$$

*Biyolojik sistemlerde sıcaklık **10 °C arttığında** hız genellikle iki katına çıkmaktadır ve biyokimyasal reaksiyonların aktivasyon enerjisi ~ **50 kJ/mol** civarındadır.*

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak. Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

ÖRNEK-2 (**Kaynak:** Zumdahl, 2005, p760 pdf 778, Çözüm Chapter 7 p43)

Kataliz edilmemiş bir biyokimyasal reaksiyon için aktivasyon enerjisi $E_{a,cat}$=**50.0 kJ/mol**'dür. **37 °C**'de bir katalizörün varlığında, reaksiyon için hız sabiti, katalizör olmayan reaksiyona kıyasla **2 500 kat** artmıştır. Van't-Hof eşitliğindeki **frekans faktörü A'nın** hem kataliz edilmiş hem de kataliz edilmemiş reaksiyonlar için aynı olduğu varsayılarak, kataliz edilmiş reaksiyon için aktivasyon enerjisini hesaplayınız.

ÇÖZÜM:

$$k = A\exp(-E_a / RT);\ \frac{k_{cat}}{k_{uncat}} = \frac{A_{cat}\exp[-E_{a,cat}/(RT)]}{A_{uncat}\exp[-E_{a,uncat}/(RT)]} = \exp\left(\frac{-E_{a,cat}+E_{a,uncat}}{RT}\right)$$

$$2\,500 = \frac{k_{cat}}{k_{uncat}} = \exp\left(\frac{-E_{a,cat}+50\times1000\,J/mol}{8,3145\,J/\mathrm{K}\times(273,15+37\,^{o}\mathrm{C})}\right)$$

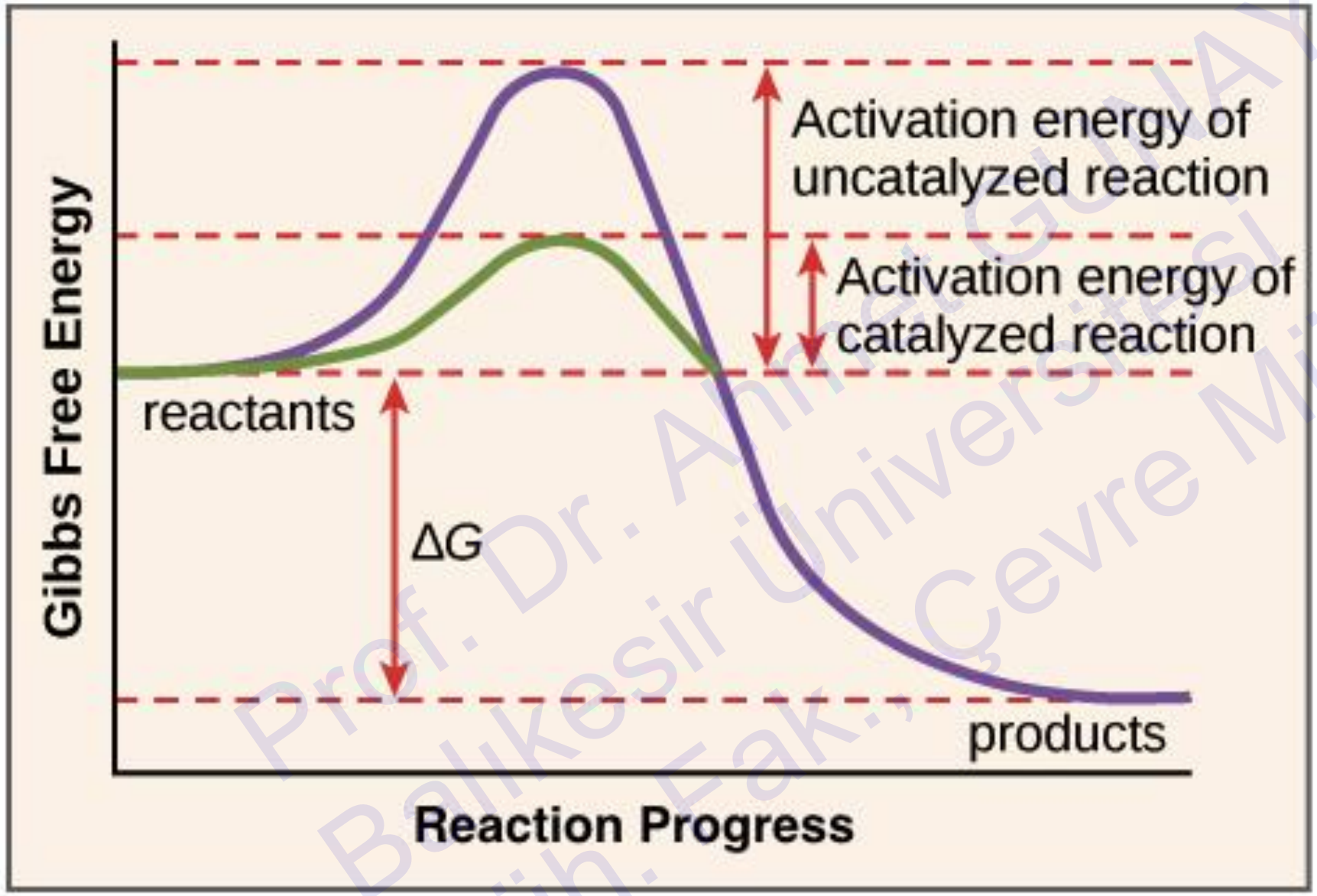
$$\ln(2\,500)\times2578,74 = -E_{a,cat}+50\times1000$$

$$20176,20 = -E_{a,cat}+50\,000 \Rightarrow E_{a,cat} = 29\,823,8\,J/mol = 29,82kJ/mol$$

Katalizlenmemiş biyokimyasal reaksiyonun aktivasyon enerjisi ***$E_{a,cat}$=50.0 kJ/mol*** *değerinden katalizör kullanılmasıyla* ***29,82 kJ/mol*** *değerine düşmektedir.*

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

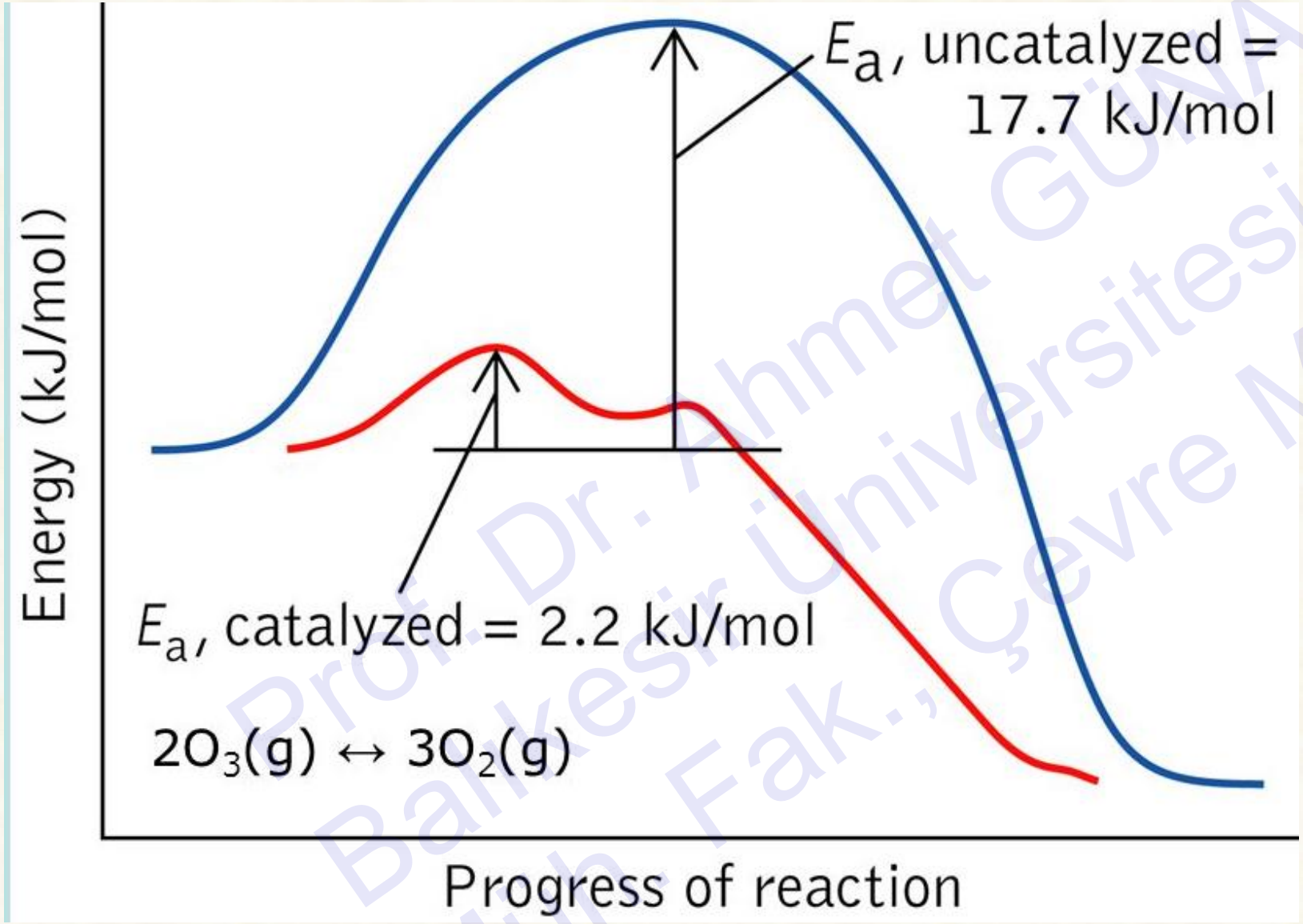
Prof.Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.



*Reaksiyonları hızlandırmak için **katalizör** kullanılır.*

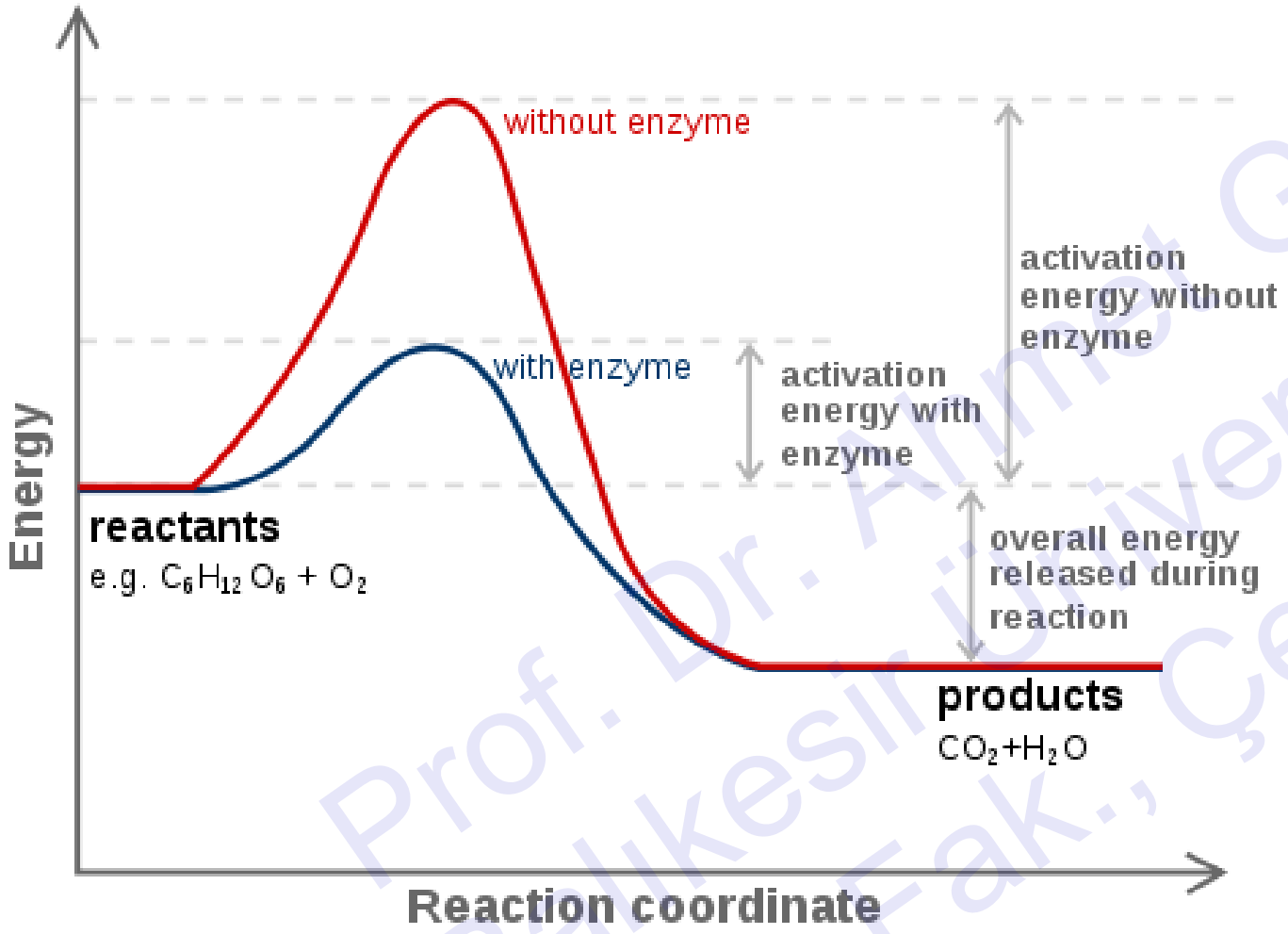
Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com



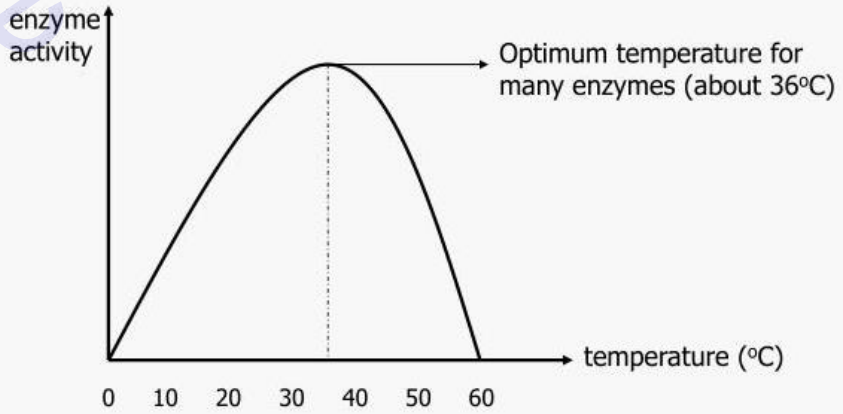
Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com



*Biyokimyasal reaksiyonları hızlandırmak için **enzim** kullanılır.*

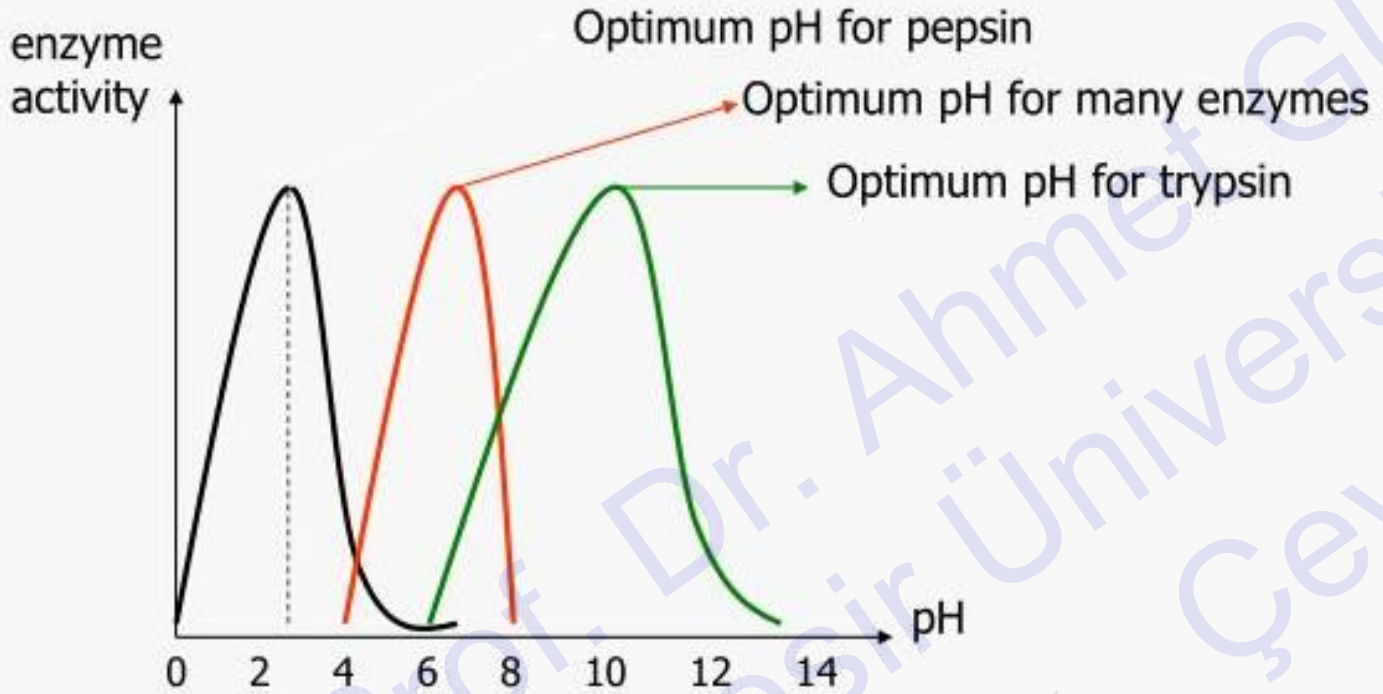
2. Enzymes enable cell reactions to take place at normal temperatures.



Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

3. Each enzyme works best at a certain pH.



✓ The effectiveness of an enzyme depends on the pH of medium.

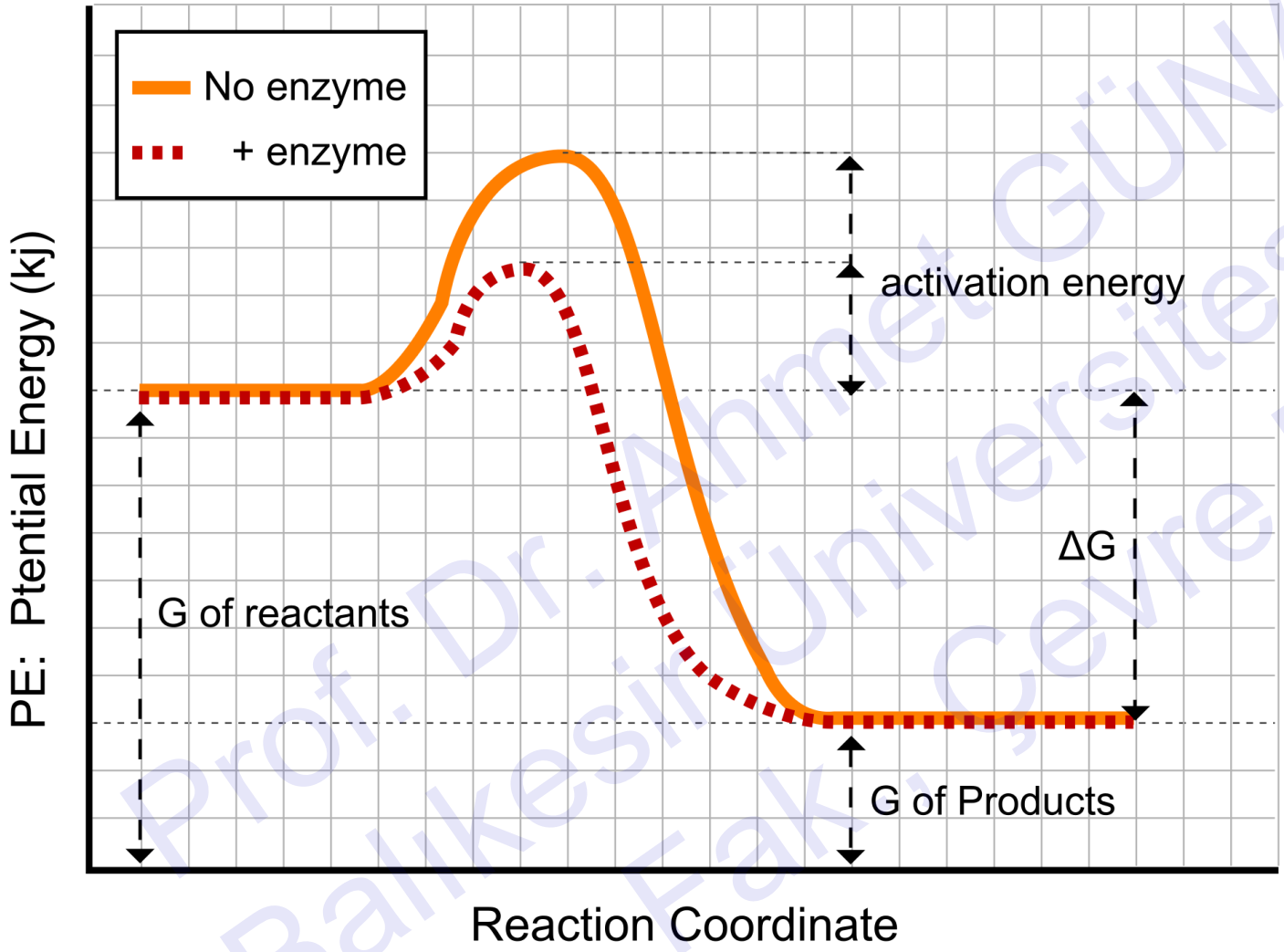
✓ Each enzyme works at different pH values.

Enzimlerin aktivitesini engelleyen inhibitörler;

- Antibiyotikler,
- Pestisitler,
- Herbisitler,
- Ağır metaller (Pb^{2+}, Hg^{2+}, Ag^{2+})
- CO,
- Yılan ve akrep zehirleri,
- CN

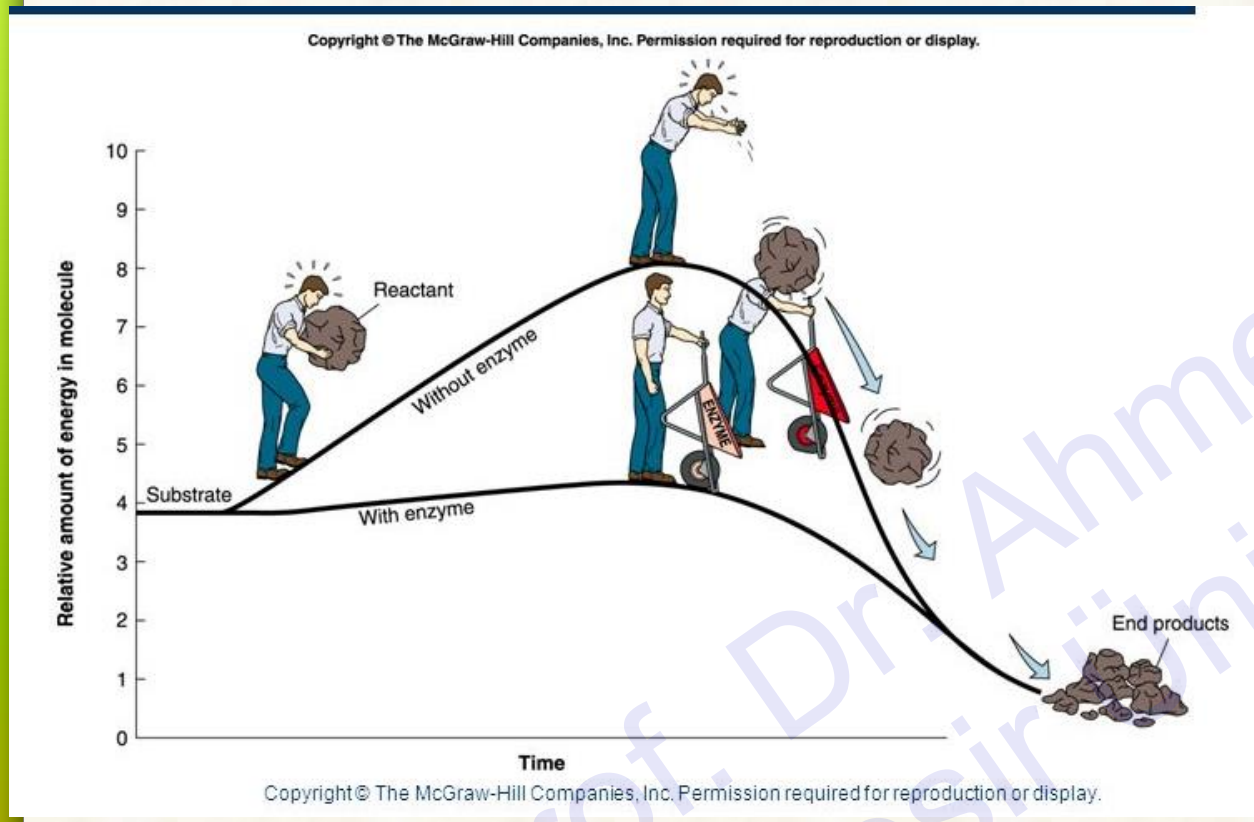
Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

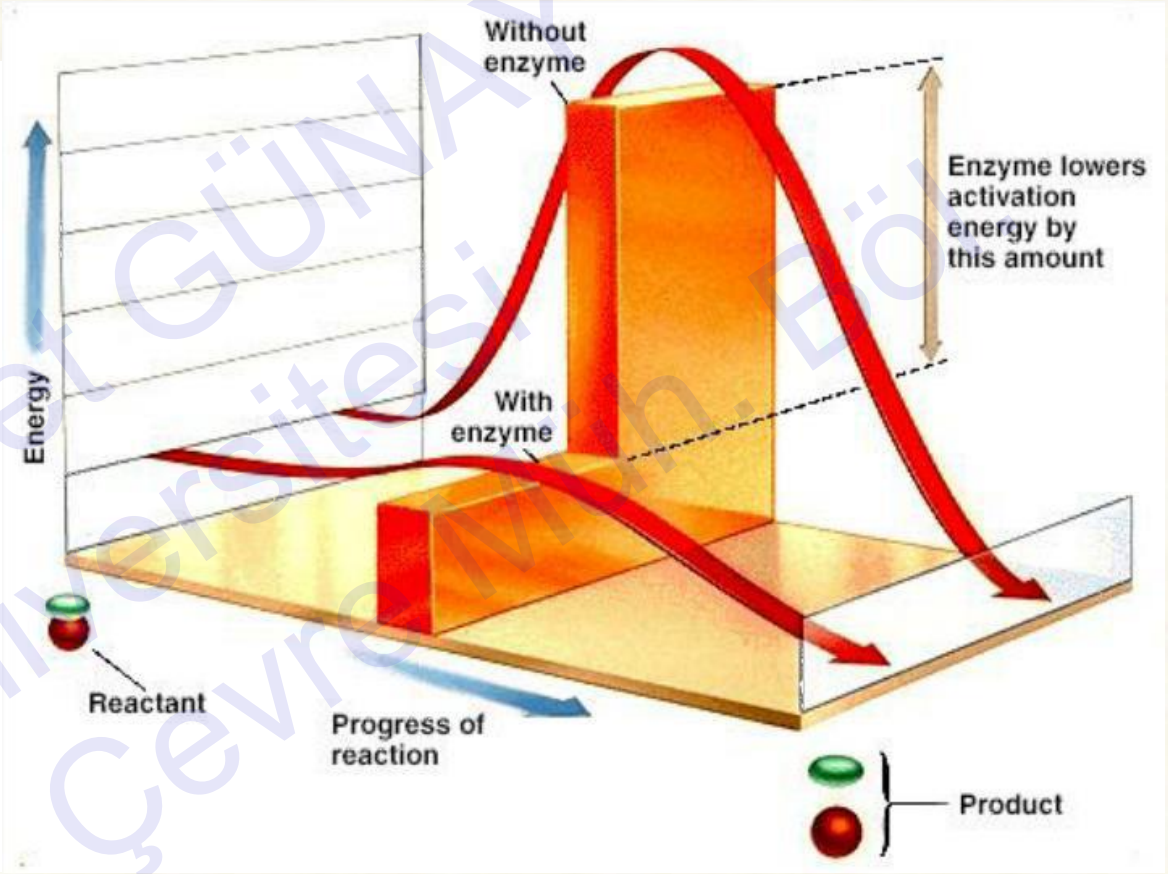
Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com



Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak. Çevre Müh. Böl.

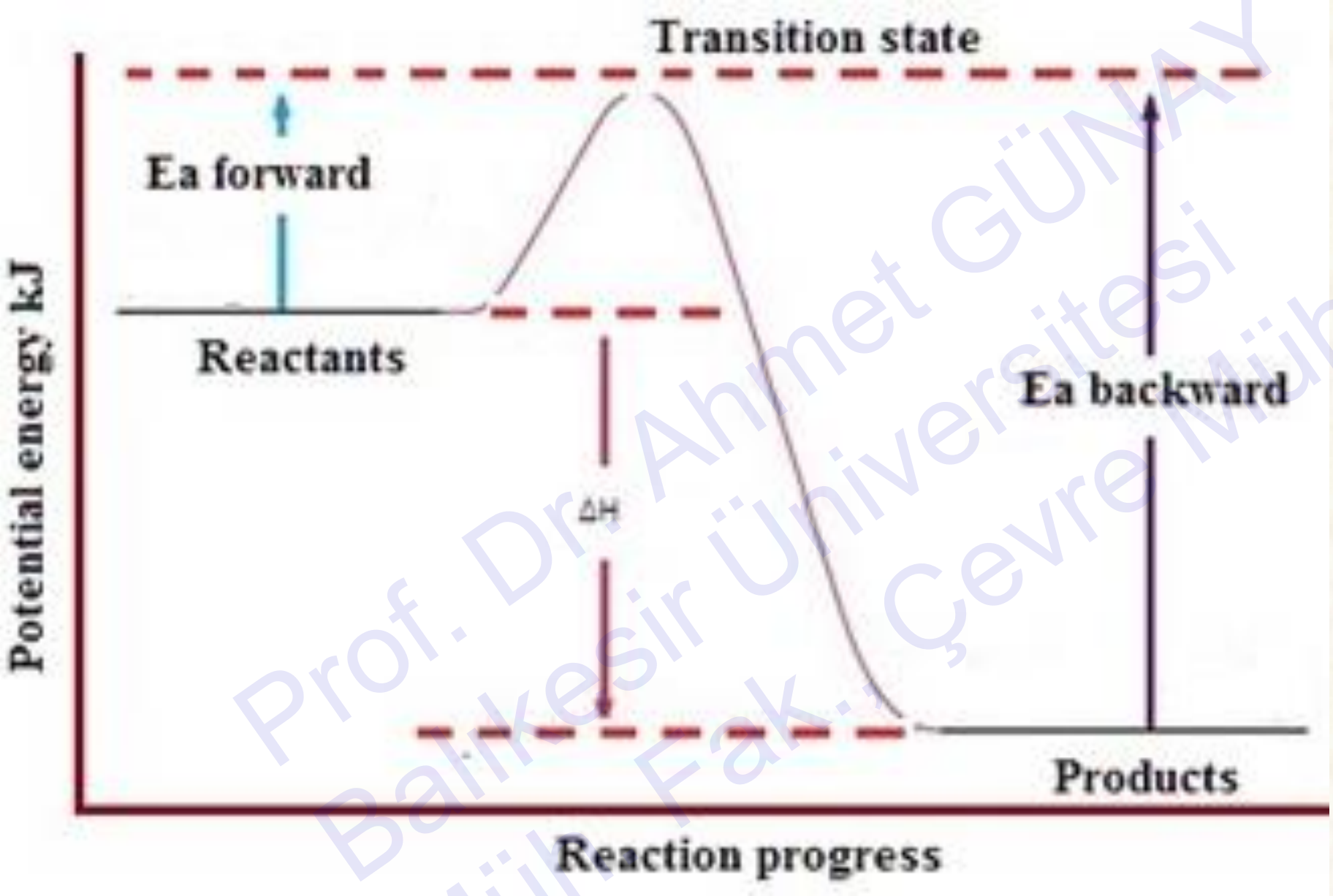
Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com





Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com



Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak. Çevre Müh. Böl.

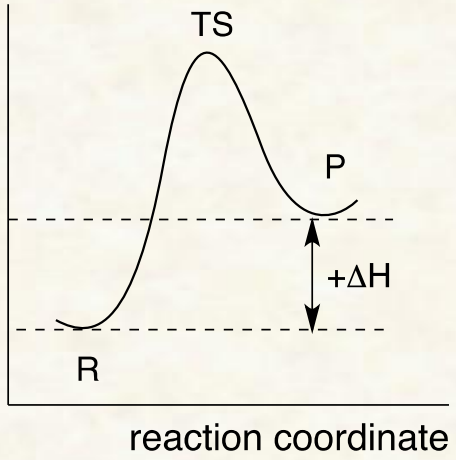
Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Free Energy Relationship

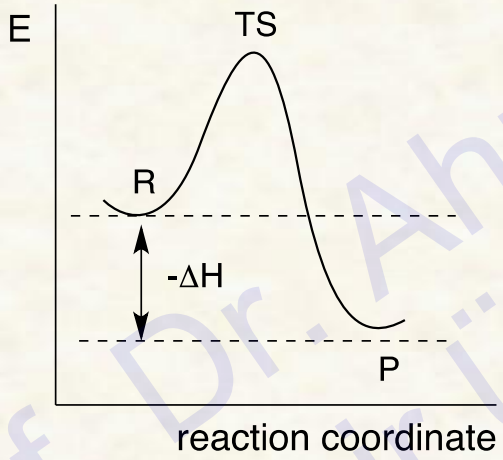
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\ln K_{eq} = -\Delta G/RT$$

Endothermic reaction

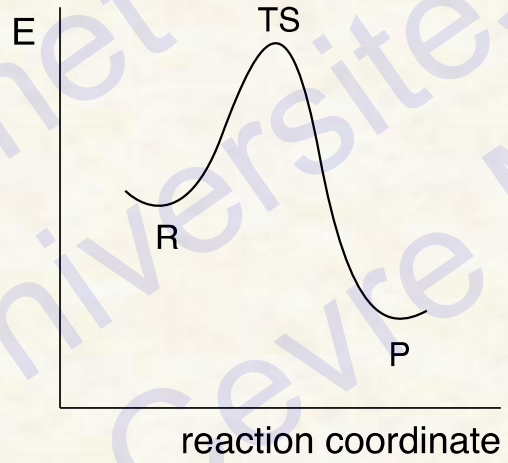


Exothermic reaction

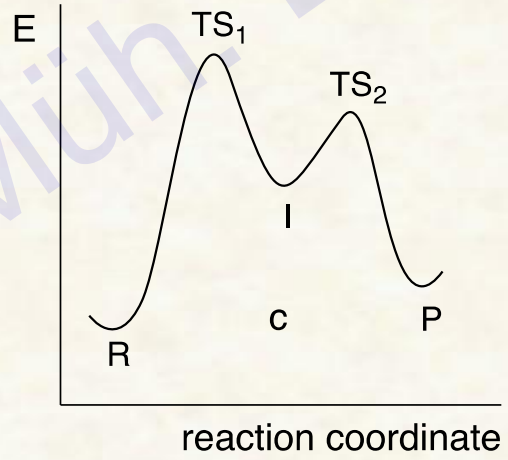


Single step vs multistep reaction

Single step reaction
- no intermediate
- i.e. S_N2 reaction

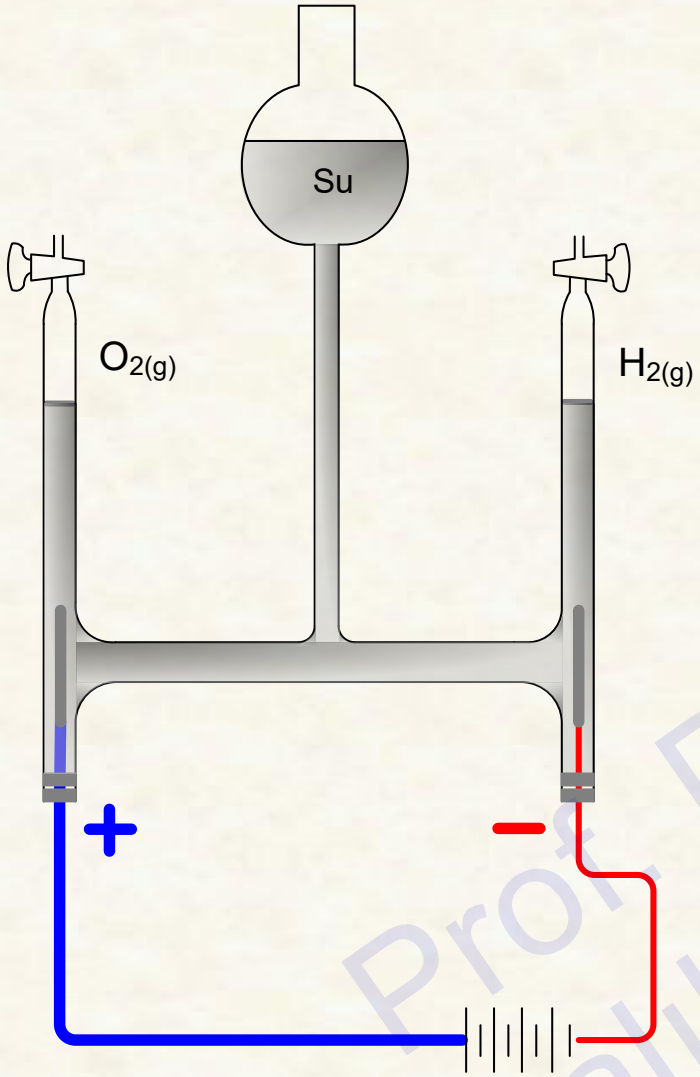


Multistep reaction
- occured via intermediate(s)
- i.e. S_N1 reaction via carbocation



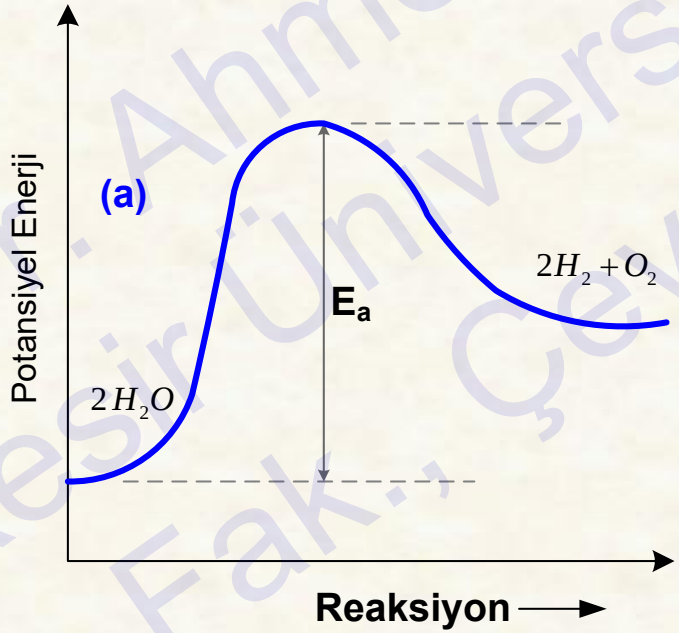
Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com



$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$$

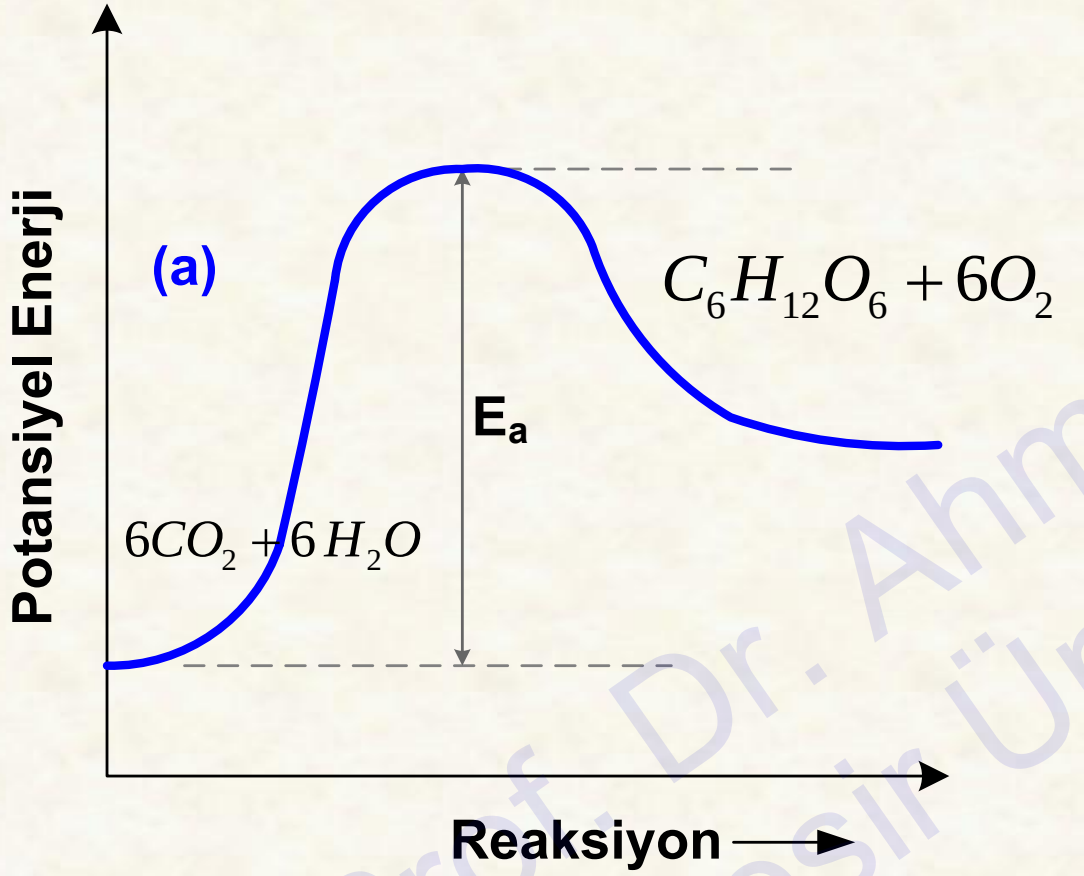
Sudan hidrojen ve oksijen elde etmek için, hidrojenin oksijenle yanmasından açığa çıkan enerjiden daha fazlasını harcamak gerekir.



ŞEKİL Suyun elektirk enerjisi ile ayrışma reaksiyonu ve potansiyel enerji diyagramı

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.



Güneş ışığında bitkiler tarafından gerçekleştirilen sentez reaksiyonu fotosentezdir ve reaksiyon karanlıkta durur.

ŞEKİL Endotermik fotosentez reaksiyonun potansiyel enerji diyagramı

$$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow[enerjisi]{Güneş} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

ÖRNEK-3: Anaerobik arıtmadan elde edilen aşağıdaki kinetik sabitlerin aktivasyon enerjisini hesaplayınız.

TABLO: Anaerobik arıtmada asetat için k ve Ks'nin farklı sıcaklıklardaki değerleri (Speece, 1996)

Sıcaklık, ^oC	k, gün^{-1}	Ks, mg/l
35	6,67	164
25	4,65	930
20	3,85	2130

- *Bu veriler nasıl derlenebilir?*
- *Reakrörün kararlı hale gelmesi nedir?*
- *Reaktör ne zaman kararlı hale gelir?*
- *Veriler, reaktör kararlı hale gelmeden derlense sonuçların nasıl çıkması beklenebilir?*

$$k = A \times üs(-E_a / RT) = A\,e^{(-E_a/RT)} = A \times \exp(-E_a / RT)$$

$$\text{Gaz sabiti; } R = 8,314\ J / mol - K$$

$$\text{Lineerleştirilmiş eşitlik; } \quad \ln k = \ln A + \left(\frac{-Ea}{R}\right) \times \left(\frac{1}{T}\right)$$

Yarı doygunluk sabiti, K_s, sıcaklıkla ters orantılı olduğundan ve biyokimyasal reaksiyonda negatif aktivasyon enerjisi beklenmediğinden Arhenius denklemindeki **k** yerine **1/K_s** değerleri ile işlem yapılır.

Negatif aktivasyon enerjisi sıcaklık artışı ile reaksiyon hızının düştüğü durumlarda olabilir.

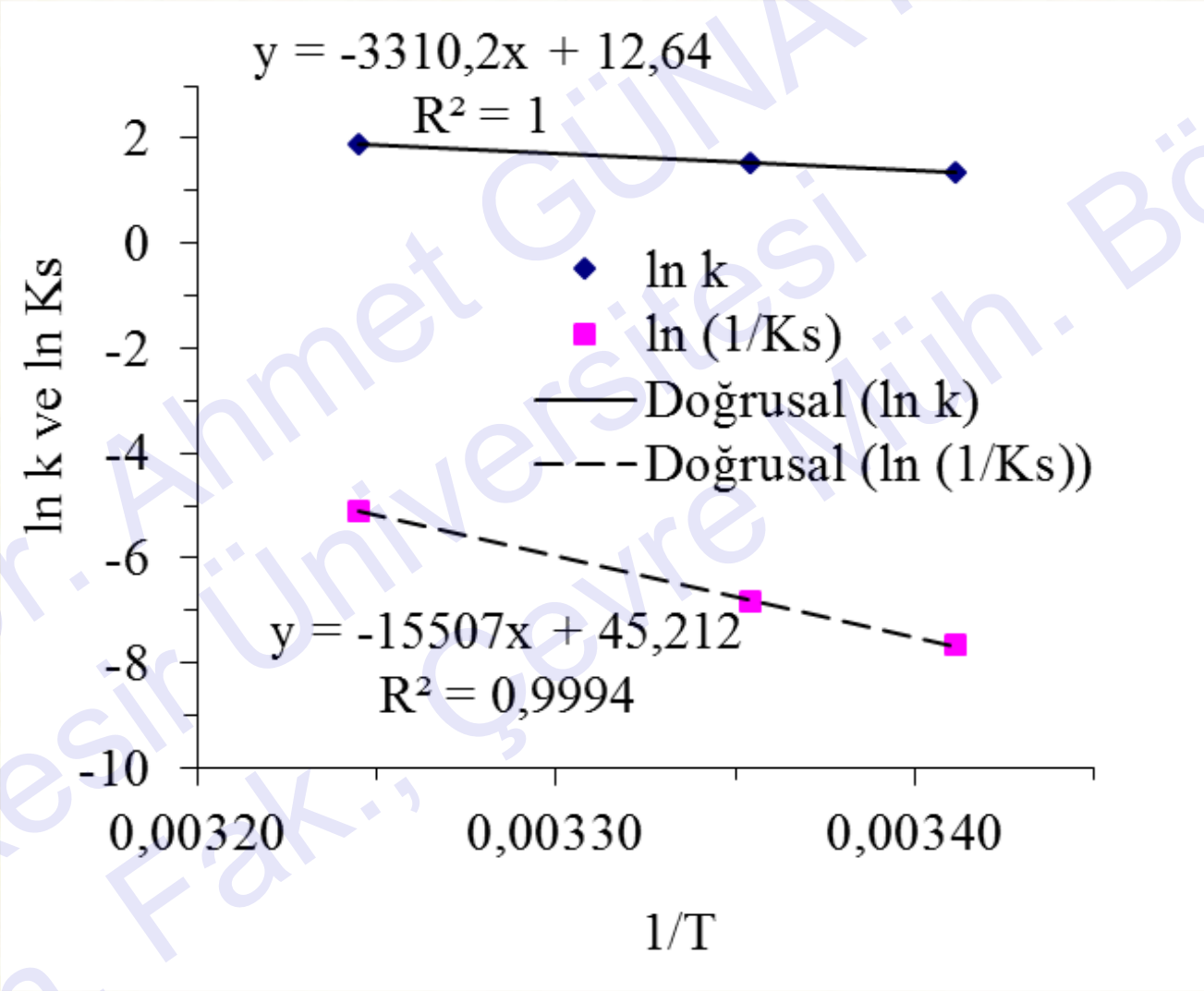
Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

ÇÖZÜM: Apsiste 1/T ve ordinatta ln k ve ln Ks değerleri olacak şekilde aşağıdaki tablo ve şekil oluşturulur.

$$\ln k = \ln A + \left(\frac{-Ea}{R}\right) \times \left(\frac{1}{T}\right)$$

X	Y_1	Y_2
1/T	ln k	ln (1/Ks)
0,00325	1,898	-5,100
0,00335	1,537	-6,835
0,00341	1,348	-7,664



ŞEKİL: 1/T'ye karşı ln k ve Ln Ks grafiği

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

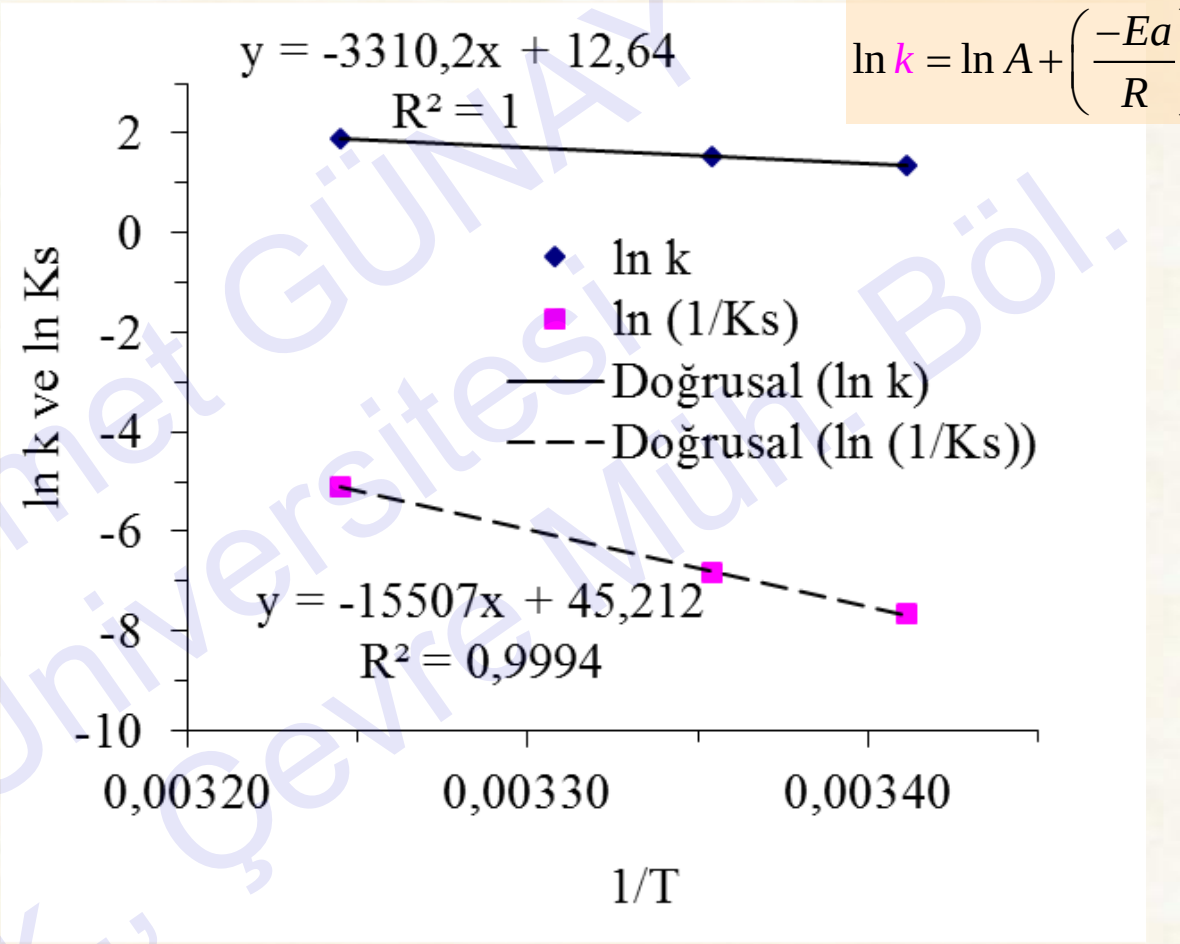
Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

ÇÖZÜM (devamı)

	k	Ks
İntersept	12,64	45,21
Eğim	-3310,17	-15507,28
R^2	-1,000	-1,000
ln A (intersept)	12,64	45,21
A	308527	$4{,}32\times10^{19}$
Ea/R (eğim)	-3310,17	-15507,28
E_a, kJ/mol	**27,52**	**128,93**
E_a, kcal/mol	6,57	30,80
θ=üs(Ea/(RT$_1$T$_2$)	**1,037**	**1,187**

$$\text{Gaz sabiti; } R = 8{,}314\ J/mol-K$$

$$\ln k = \ln A + \left(\frac{-Ea}{R}\right)\times\left(\frac{1}{T}\right)$$



ŞEKİL: 1/T'ye karşı ln k ve Ln Ks grafiği

Yarı doygunluk sabitinin, Ks'nin, aktivasyon enerjisi daha yüksek olduğundan, Ks değerinin sıcaklığa bağımlılığı daha fazladır. Ks, mikroorganizmaların substrat bileşenlerine afinitesini karakterize eder. Sıcaklık düştüğünde anaerobik mikroorganizmaların substrata olan ilgisi de azalmaktadır.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

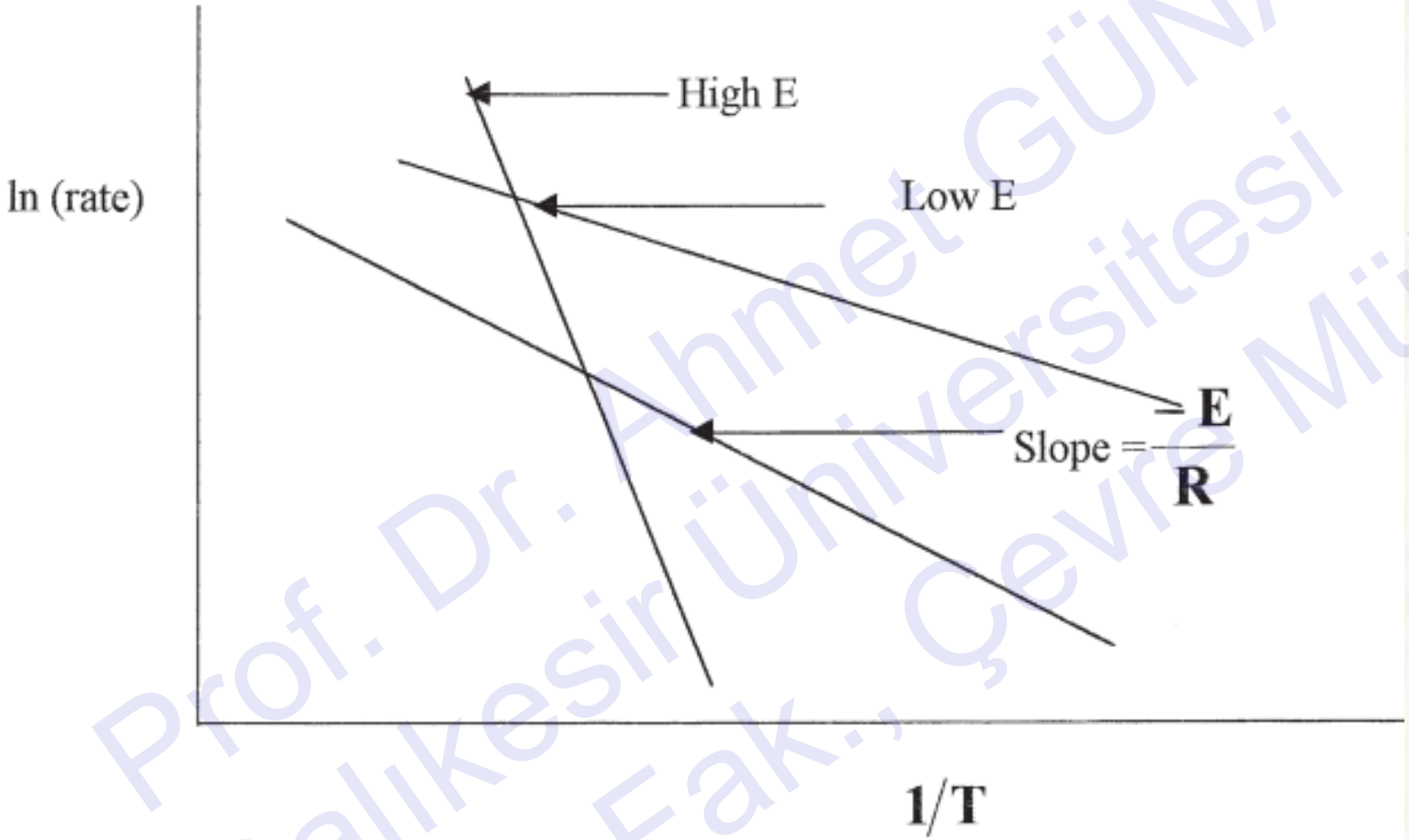


Figure 3-2. Temperature dependency of the reaction rate.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

ÖRNEK-4: Anaerobik biyokimyasal bir reaksiyondan elde edilen kinetik sabitler aşağıdaki gibi elde edilmiştir . **Aktivasyon enerjisini, sıcaklık katsayısını ve 35 °C için hız sabitini hesaplayınız.**

Sıcaklık, ºC	Sıcaklık, K	k, gün^{-1}
10	283,15	0,012
15	288,15	0,018
20	293,15	0,026
25	298,15	0,038
30	303,15	0,055

$$k = A \times üs(-E_a / RT) = A e^{(-E_a/RT)}$$

$$\text{Gaz sabiti; } R = 8,314\ J/mol-K$$

Lineerleştirilmiş eşitlik; $$\ln k = \ln A + \left(\frac{-Ea}{R}\right) \times \left(\frac{1}{T}\right)$$

ÇÖZÜM:

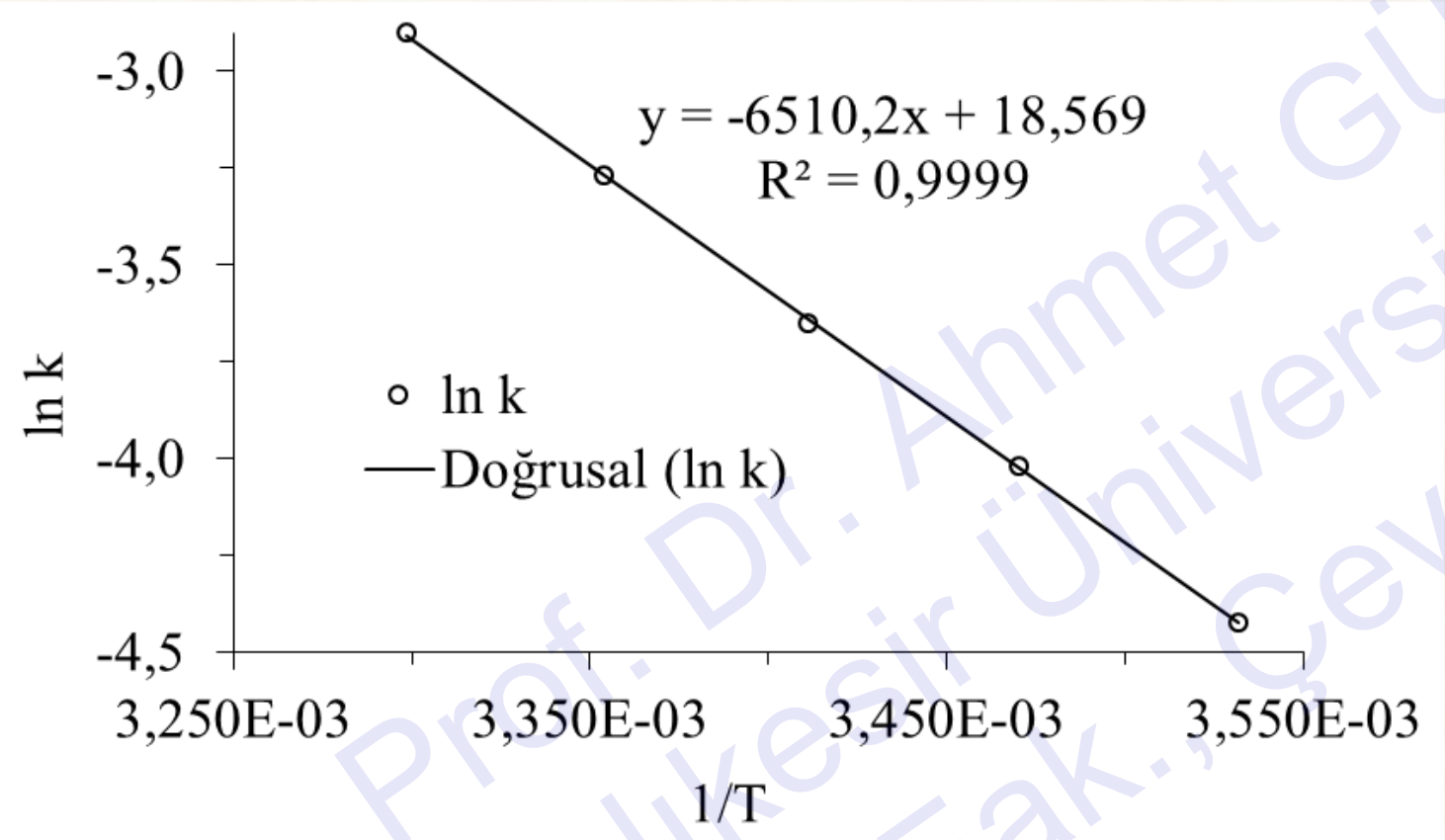
1/T	Ln k
3,532E-03	-4,423
3,470E-03	-4,017
3,411E-03	-3,650
3,354E-03	-3,270
3,299E-03	-2,900

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

$$\ln k = \ln A + \left(\frac{-Ea}{R}\right) \times \left(\frac{1}{T}\right)$$

Gaz sabiti; $R = 8,314\ J\ /\ mol - K$



İntersept	**18,57**
Eğim	**-6510,24**
R^2	**0,9999**
ln A	**18,57**
A	**1,16E+08**
Ea/R	**-6510,24**
E_a, kJ/mol	**54,13**
E_a, cal/mol	**12928**
θ=üs(Ea/(RT$_1$T$_2$)	**1,0205**

$$\frac{k_2}{k_1} = 1,0205^{(T_2 - T_1)}$$

$$k_2 = k_1 \times 1,0205^{(T_2 - T_1)}$$

$$k_{35^oC} = k_{20^oC} \times 1,0205^{(35-20)} = 0,026 \times 1,0205^{(35-20)} = 0,0609\ g\ddot{u}n^{-1}$$

35 °C ???

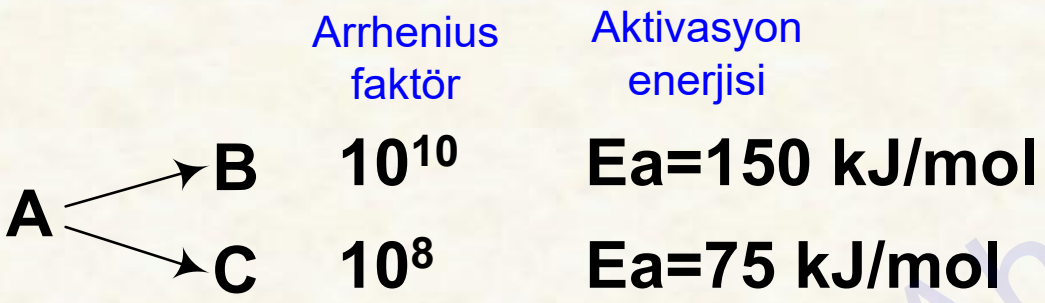
10-30 °C aralığında sıcaklık düzeltme katsayısı, ***θ=1,0205***

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

ÖRNEK-5: Birinci mertebe paralel bir reaksiyonda iki ürün oluşumunun Arrhenius faktörü **10^{10} ve 10^{8} sn^{-1}** ve aktivasyon enerjileri sırasıyla **150 ve 75 kJ/mol**'dür. **Hangi sıcaklıkta** iki ürün oluşumunun hızı aynıdır?

Kaynak: Chemical_Kinetics_and_Reaction p,74



1.

$$k_1 = A_1 - \frac{E_{a,1}}{RT} = 10^{10} \times e^{\frac{150\times10^3}{8,314\times T}}$$

$$k_2 = A_2 - \frac{E_{a,2}}{RT} = 10^{8} \times e^{\frac{75\times10^3}{8,314\times T}}$$

2.

$$k_1 = k_2$$

3.

$$10^{10} \times e^{\frac{150\times10^3}{8,314\times T}} = 10^{8} \times e^{\frac{75\times10^3}{8,314\times T}}$$

$$2,303\times10 - \frac{150\times10^3}{8,314\times T} = 2,303\times8 - \frac{75\times10^3}{8,314\times T}$$

$$2,303\times(10-8) = \frac{(150-75)\times10^3}{8,314\times T}$$

$$2,303\times2 = \frac{75\times10^3}{8,314\times T}$$

$$T = \frac{75\times10^3}{2,303\times2\times8,314} = 1958,5\,K$$

$$= 1685,35\,^{o}C$$

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

ÖRNEK-6: **20 °C'de** birinci mertebe bir reaksiyonun hız sabiti **0,0232 gün^{-1}**'dir. Reaksiyonun aktivasyon enerjisi **15,0 kJ/mol** ve Arrhenius sabiti, A sıcaklıktan bağımsız (sabit) olduğuna göre **30 °C**'deki reaksiyon hızının değeri nedir? (12A_Chemical Principles, S Zumdahl, p774, çözüm Chapter 15- p26)

$$k = A \times üs(-E_a / RT) = A \times \exp(-E_a / RT) = A \times e^{(-E_a/RT)}$$

$$\text{Gaz sabiti; } R = 8,314\ J/mol-K$$

$$\ln k = \ln A + \left(\frac{-Ea}{R}\right) \times \left(\frac{1}{T}\right)$$

2.

$$\ln k_2 - \ln k_1 = \ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \left(\ln A - \frac{E_a}{RT_2}\right) - \left(\ln A - \frac{E_a}{RT_1}\right)$$

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

1.

$$\ln k_1 = \ln A - \frac{E_a}{RT_1}$$

$$\ln k_2 = \ln A - \frac{E_a}{RT_2}$$

2.

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

3.

$$\ln\left(\frac{k_2}{0,0232}\right) = \frac{15000}{8,314}\left(\frac{1}{20+273,15} - \frac{1}{30+273,15}\right)$$

$$\ln\left(\frac{k_2}{0,0232}\right) = 0,20302$$

Reaksiyon hızı 30 °C'de 1,23 katına çıkmaktadır. Bu durumda sıcaklığı 10 °C artırmaya değer mi?

$$e^{0,20302} = 1,2251 = \frac{k_2}{0,0232} \rightarrow k_2 = 0,0284\ gün^{-1}$$

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

ÖRNEK-7: Birinci mertebe bir reaksiyonun hız sabiti **15 °C'de 0,05 gün^{-1}** ve **27 °C'de 0,10 gün^{-1}**'dir. Reaksiyonun aktivasyon enerjisini hesaplayınız (12A_Chemical Principles, S Zumdahl, p774, çözüm Chapter 15- p25)

1.

$$\ln k_1 = \ln A - \frac{E_a}{RT_1}$$

$$\ln k_2 = \ln A - \frac{E_a}{RT_2}$$

2.

$$\ln k_2 - \ln k_1 = \ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \left(\ln A - \frac{E_a}{RT_2}\right) - \left(\ln A - \frac{E_a}{RT_1}\right)$$

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

$$E_a = \frac{RT_2T_1}{T_2 - T_1}\ln\frac{k_2}{k_1}$$

$$\ln\left(\frac{0,10}{0,05}\right) = \frac{E_a}{8,314}\left(\frac{1}{273,15+15} - \frac{1}{273,15+27}\right)$$

$$\ln 2 = 0,693 = E_a \times 1,662 \times 10^{-5}$$

$$E_a = 41701,55\ J/mol$$

$$= 41,70\ kJ/mol$$

$$E_a = \frac{8,314 \times (273,15+27) \times (273,15+15)}{(273,15+27) - (273,15+15)} \times \ln\frac{0,10}{0,05}$$

$$= 41534,71\ J/mol$$

$$= 41,53\ kJ/mol$$

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

ÖRNEK-8: Bir reaksiyonun aktivasyon enerjisi **54,0 kJ/mol**'dür. Reaksiyon, ortamının sıcaklığı 22 °C'den daha yüksek bir sıcaklığa arttırıldığında reaksiyon hızı **2,2 kat** artmaktadır. **Yüksek sıcaklığı hesaplayınız.**
(12A_Chemical Principles, S Zumdahl, p774, çözüm Chapter 15- p28)

1.

$$\ln k_1 = \ln A - \frac{E_a}{RT_1}$$

$$\ln k_2 = \ln A - \frac{E_a}{RT_2}$$

2.

$$\ln k_2 - \ln k_1 = \ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \left(\ln A - \frac{E_a}{RT_2}\right) - \left(\ln A - \frac{E_a}{RT_1}\right)$$

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

$$\ln\left(\frac{2,2}{1}\right) = \frac{54000}{8,314}\left(\frac{1}{273,15+22} - \frac{1}{273,15+T^oC}\right)$$

$$\ln(2,2) = 6495,07 \times \left(\frac{1}{273,15+22} - \frac{1}{273,15+T^oC}\right)$$

$$1,214\times10^{-4} = \frac{1}{273,15+22} - \frac{1}{273,15+T^oC}$$

$$1,214\times10^{-4} = 33,88\times10^{-4} - \frac{1}{273,15+T^oC}$$

$$-32,67\times10^{-4} = -\frac{1}{273,15+T^oC}$$

$$T = 306,12\,K$$

$$= 232,78 - 273,15 = 32,98\,^oC \cong 33\,^oC$$

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

ÖRNEK-9: Anaerobik bir reaksiyonun **35 °C**'deki ikinci mertebe reaksiyon hızı **0,05 L/mg-gün**'dür. Biyokimyasal reaksiyonun aktivasyon enerjisi **55,0 kJ/mol**'dür. Reaktörün sıcaklığı **25 °C**'ye düşürüldüğünde aynı arıtma verimi için 35 °C'dekinin kaç katı kadar hidrolik bekletme süresi gerekir?

1. 25 °C'de reaksiyonun hız sabiti;

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right)=\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}\right)$$

$$\ln\left(\frac{k_2}{0,05}\right)=\frac{55\,000}{8,314}\left(\frac{1}{273,15+35}-\frac{1}{T_2}\right)$$

$$=-0,72$$

$$e^{-0,72}=\frac{k_2}{0,05}\rightarrow k_2=0,4867\times 0,05=0,0243\ L/\text{mg}-gün$$

2. İkinci mertebe reaksiyon kinetiği;

$$-\frac{d[C]}{dt}=k[C]^2 \qquad \frac{1}{[C]_t}=\frac{1}{[C]_0}+kt \qquad t_{1/2}=\frac{1}{k[C]_0}$$

$$35\,^oC\text{'de}\rightarrow \frac{1}{[C]_t}=\frac{1}{[C]_0}+0,050\times t_{35\,^oC}$$

$$25\,^oC\text{'de}\rightarrow \frac{1}{[C]_t}=\frac{1}{[C]_0}+0,0243\times t_{25\,^oC}$$

$$0,050\times t_{35\,^oC}=0,0243\times t_{25\,^oC}$$

$$t_{25\,^oC}=\frac{0,050}{0,0243}t_{35\,^oC}=2,06\times t_{35\,^oC}$$

25 °C'de aynı verimi elde edebilmek için reaktördeki HBS 2,06 katına, dolayısıyla reaktör hacmi de iki katına çıkarılmalıdır. Sıcaklık 10 °C düştüğünde mikrobiyal aktivite de yarıya düşer.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak. Çevre Müh. Böl.

ÖRNEK-10: Sütün pastörizasyonunda aktivasyon enerjisi

(Kaynak: Chemical Reaction Engineering, Octave Levenspiel, P45)

Sütün pastörizasyonu;

- 63 ^{0}C'de 30 dk
- 74 ^{0}C'de 15 sn

Bu pastörizasyon prosesinin aktivasyon enerjisini hesaplayınız.

ÇÖZÜM: Prosesin sıcaklığa bağımlılığı Arrhenius eşitliğine uyar.

- T_1=336 K'de 30 dk
- T_2=347 K'de 15 sn

Pastörizasyon hızı reaksiyon süresi ile ters orantılıdır: kısa anlatımla, hız ∝ 1/zaman.

$$\ln\frac{r_2}{r_1} = \ln\frac{t_1}{t_2} = \frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

$$\ln\frac{r_2}{r_1} = \ln\frac{30}{0,25} = \frac{E_a}{8,314}\left(\frac{1}{336} - \frac{1}{347}\right)$$

$$E = 422\ kJ/mol$$

Sütün pastörizasyonunda sıcaklığa bağımlılık oldukça yüksektir. Düşük sıcaklıklarda pastörizasyon gerçekleşmez.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

ÖRNEK-11: Aktivasyon enerjisi ve yarılanma ömrü

Birinci mertebe anaerobik biyokimyasal bir reaksiyonun farklı sıcaklıklarda yarılanma ömrü aşağıdaki gibidir.

Aktivasyon enerjisini hesaplayınız.

(**Kaynak**: Chemical Reaction Engineering Handbook of Solved Problems p206)

T, °C	15	20	25	35
$t_{1/2}$, gün	7	5	3,6	2

Birinci mertebe reaksiyonlar için yarılanma ömrü; $k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$

$$k = A \times e^{(-E_a/RT)}$$

$$\ln k = \ln A + \left(\frac{-Ea}{R}\right) \times \left(\frac{1}{T}\right)$$

T, °C	T, K	$t_{1/2}$, gün	$k=\ln 2/t_{1/2}$	1/T, K^{-1}	lnk
15	288,15	7	0,0990	0,003470	-2,312
20	293,15	5	0,1386	0,003411	-1,976
25	298,15	3,6	0,1925	0,003354	-1,647
35	308,15	2	0,3466	0,003245	-1,060

$$-\frac{E_a}{R} = -5561,4$$

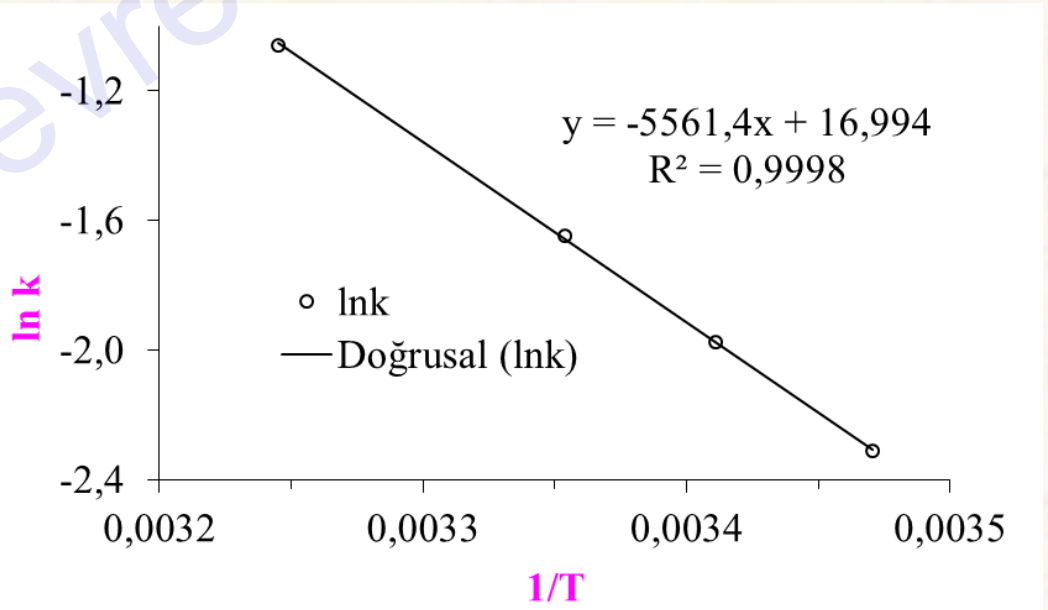
$$E_a = 5561,4 \times 8,314 = 46\,237,39\ J/mol$$

$$= 46,24\ kJ/mol$$

$$-E_a = -5561,4 \times 1,987$$

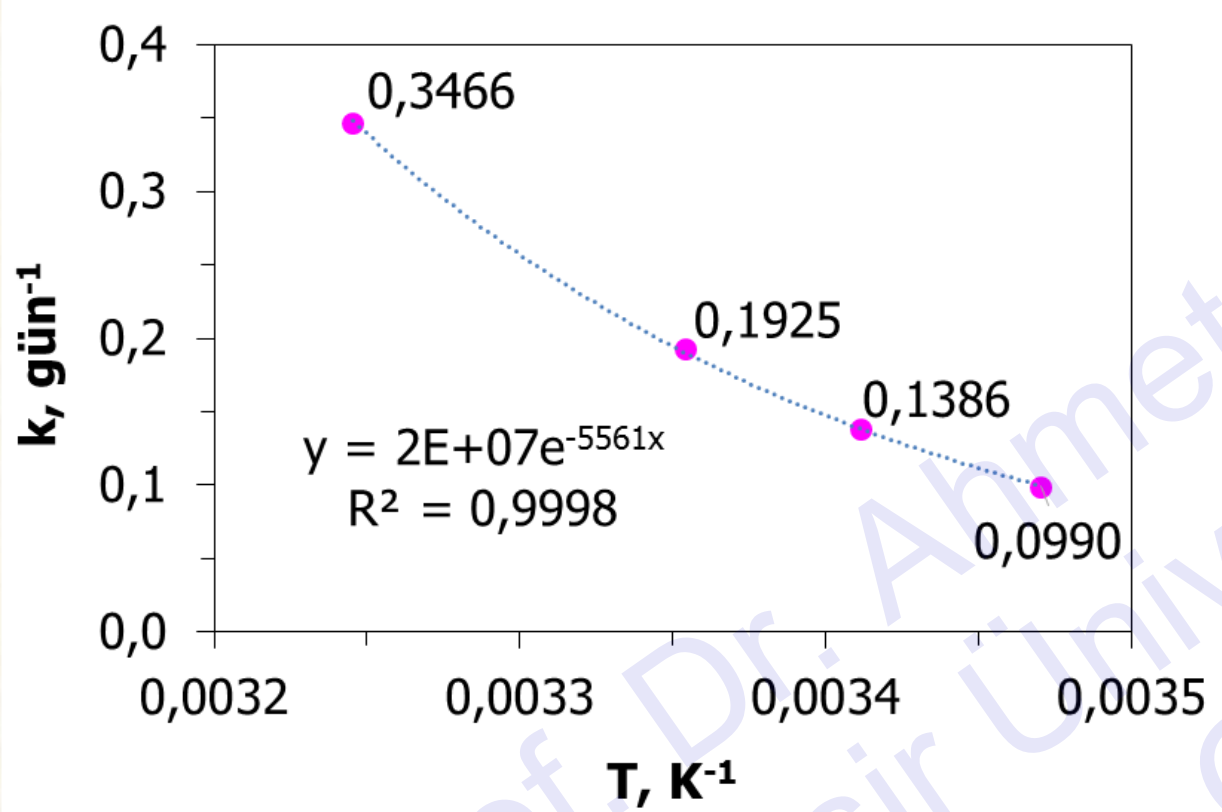
$$E_a = 11050,48\ cal/mol$$

$$= 11,05\ kcal/mol$$



Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak. Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com



$$k = A \times üs(-E_a / RT)$$

$$-\frac{E_a}{R} = -5561$$

$$E_a = 5561 \times 8,314 = 45216,50\ J/mol$$

$$= 45,22\ kJ/mol$$

$$A = 2 \times 10^7$$

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

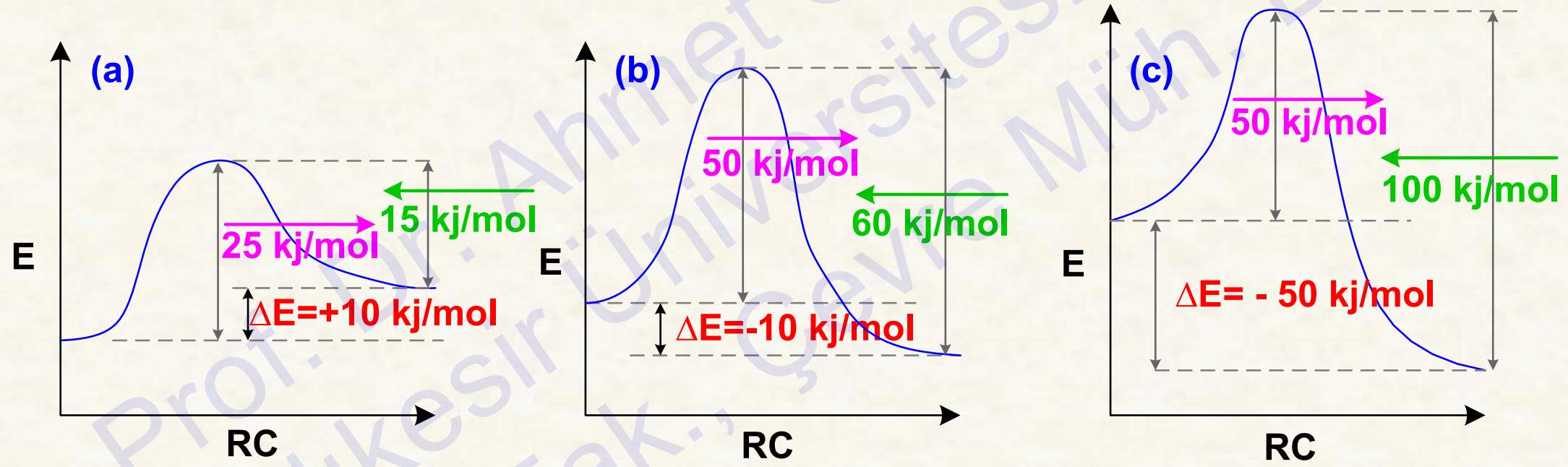
ÖRNEK: Enerji profili aşağıdaki gibi olan reaksiyon için enerji krokisini çiziniz. Tüm reaksiyonlar için frekans faktörü aynı olduğuna göre 298 K'de hangi reaksiyonun hızı fazladır?

- ΔE= +10 kj/mol, E_a=25 kJ/mol
- ΔE= - 10 kj/mol, E_a=50 kJ/mol
- ΔE= - 50 kj/mol, E_a=50 kJ/mol

(Kaynak:12A_Chemical_Principles, S Zumdahl, p775-pch15-29)

Hangi durumlarda hangi reaksiyon enerjisi krokisi tercih edilir?

ÇÖZÜM



I - ΔE değeri pozitif olduğunda **(ΔE>0) ürünler** reaktantlara göre daha fazla enerjiye sahip olur. Tersi durumda **(ΔE<0)** reaktantların enerjisi ürünlere göre fazladır.

II- (a) reaksiyonunun aktivasyon enerjisi en düşük olduğundan **(b)** ve **(c)**'ye göre hızlı gerçekleşecektir.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

ÖRNEK: (Kaynak:12A_Chemical_Principles, S Zumdahl, p775-pch15-29)

Aşağıdaki reaksiyon için aktivasyon enerjisi **E_a=125 kj/mol** ve reaksiyonun enerji değişimi **ΔE= -216 kj/mol**'dür.

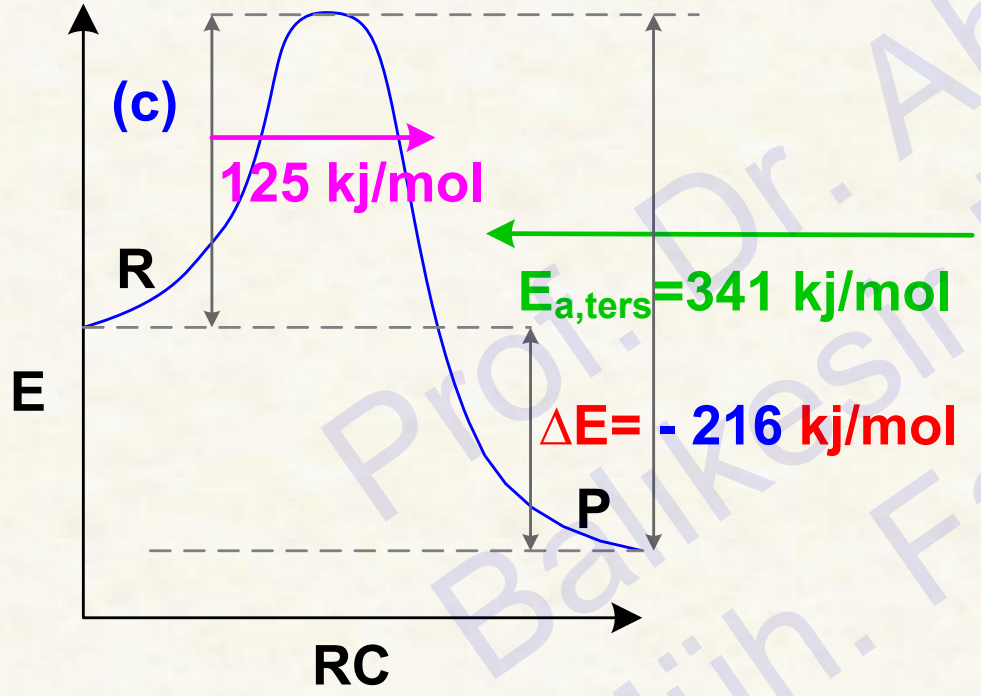
$$NO_{2\,(g)} + CO_{(g)} \rightarrow NO_{(g)} + CO_{2\,(g)}$$

Reaksiyonun ters yönde gerçekleşmesi halinde aktivasyon enerjisi ne kadar olur?

$$NO_{(g)} + CO_{2\,(g)} \rightarrow NO_{2\,(g)} + CO_{(g)}$$

ÇÖZÜM:

Reaksiyonun enerji krokisi;



Reaksiyonun ters yönde gerçekleşmesi halinde aktivasyon enerjisi 125 kJ/mol+216 kJ/mol=**341 kJ/mol** olmaktadır. Atıkların sabitlenmesi (fixation) yöntemiyle bertaraf edilmesi halinde ters yönde yüksek aktivasyon enerjisi bertaraf güvenliği sağlar.

Atık uçucu kül ile bazı atık türleri muamele edilerek depolandıktan sonra tekrar çözünme (ters) reaksiyonunun yüksek aktivasyon enerjisi depolanan atıkların çevre ile etkileşim ortaya koymayacağını gösterebilir.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak. Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

ÖRNEK (Kaynak: http://www.chem1.com/acad/webtext/dynamics/dynamics-3.html Erişim: Ekim 2017)

It takes about 3.0 minutes to cook a hard-boiled egg in Los Angeles (LA), but at the higher altitude of Denver, where water boils at 92°C, the cooking time is 4.5 minutes. Use this information to estimate the activation energy for the coagulation of egg albumin protein.

Solution: The ratio of the rate constants at the elevations of LA and Denver is 4.5/3.0 = 1.5, and the respective temperatures are 373K and 365K. With the subscripts 2 and 1 referring to LA and Denver respectively, we have

E_a = (8.314)(ln 1.5) / (1/365 – 1/273) = (8.314)(0.405) / (0.00274 – 0.00366)
= (3.37 J mol^{-1} K^{-1}) / (0.000923 K^{-1}) = 3650 J mol^{-1} = **3.65 kJ mol^{-1}**

Comment: This rather low value seems reasonable because protein denaturation involves the disruption of relatively weak hydrogen bonds; no covalent bonds are broken.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

İLAVE VERİLER

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

TABLE 7-1. Summary of results of three ASBR at different temperature and HRT

Temp. (°C)	Reciprocal Temp. (1000/(°K^{-1}))	HRT (hours)	Effluent SCOD (mgl^{-1})	SCOD Removal Rate (%)	Reactor MLVSS (mgl^{-1})
25	3.354	24	9	98.5	8980
		16	15	97.5	9860
		12	23	96.3	8890
		8	26	95.7	9750
		6	30	95	9330
20	3.411	24	16	94.2	8340
		16	28	95.3	9410
		12	35	94.2	9660
		8	45	92.5	9260
		6	52	91.3	9120
17.5	3.44	24	31	89.7	7540
		16	54	91	8620
		12	52	91.2	7960
		8	68	88.7	8450
		6	98	83.7	8930
15	3.47	24	40	86.3	7330
		16	60	90	8410
		12	80	85.3	7950
		8	91	84.8	8350
		6	111	81.5	8690
12.5	3.5	24	48	83	6980
		16	88	85.3	8670
		12	81	86.5	7870
		8	98	83.7	8320
		6	132	78	8870
10	3.532	24	78	77.2	6440
		16	135	77.5	8160
		12	134	77.7	7780
		8	158	73.7	8340
		6	189	68.5	8640
7.5	3.563	24	90	72	6470
		16	148	75.3	7890
		12	148	75.2	7850
		8	188	68.7	8120
		6	212	64.7	9210
5	3.595	24	140	67.7	6020
		16	172	71.3	7650
		12	183	72.8	7080
		8	198	67	7520
		6	228	62	8230

Kaynak:
A826514_High-rate Anaerobic Treatment of Dilute Wastewater and Psychrophilic Temperature

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Table 7-2 Kinetic Parameters

Temp., (°C)	K (T). (d^{-1})	Ks(T). mgl^{-1}	K_d. (d^{-1})	Yg(T)	μ m (T). (d^{-1})
25	1.59	218.6	.0062	.149	.237
20	1.14	259.5	.0043	.129	.147
17.5	1.12	448.8	.005	.138	.155
15	1.06	534.3	.0041	.145	.154
12.5	0.69	395.2	.0029	.153	.106
10	0.53	476.6	.0027	.178	.094
7.5	0.42	424.0	.0017	.183	.077
5	-0.42	811.2	.0014	.165	-.069

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak. Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com

Table 7-5 Summary of activation energy and $[\theta]$ values for different kinetic parameters.

	Maxm. substrate utilization rate, K (d^{-1})	Maxm. sp. growth rate μ_m (d^{-1})	Decay rate, K_d (d^{-1})	Half velocity constant (K_s) (mgl^{-1})
E.cal.mole^{-1}	12670	10500	12140	8420
θ	1.083	1.062	1.076	1.05
R^2	0.93	0.92	0.93	0.70

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi
Müh. Fak., Çevre Müh. Böl.

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Böl. Çağış/Balıkesir, agunay@balikesir.edu.tr, ahmetgunay2@gmail.com