Elektrokemija

Seminar

13.5.2025.

1. Izračunajte prosječne koeficijente aktiviteta vodenih otopina NaCl sljedećih molaliteta prema Debye-Hückelovom zakonu i Debye-Hückelovom graničnom zakonu i usporedite ih s eksperimentalno određenim vrijednostima pri 25 °C:

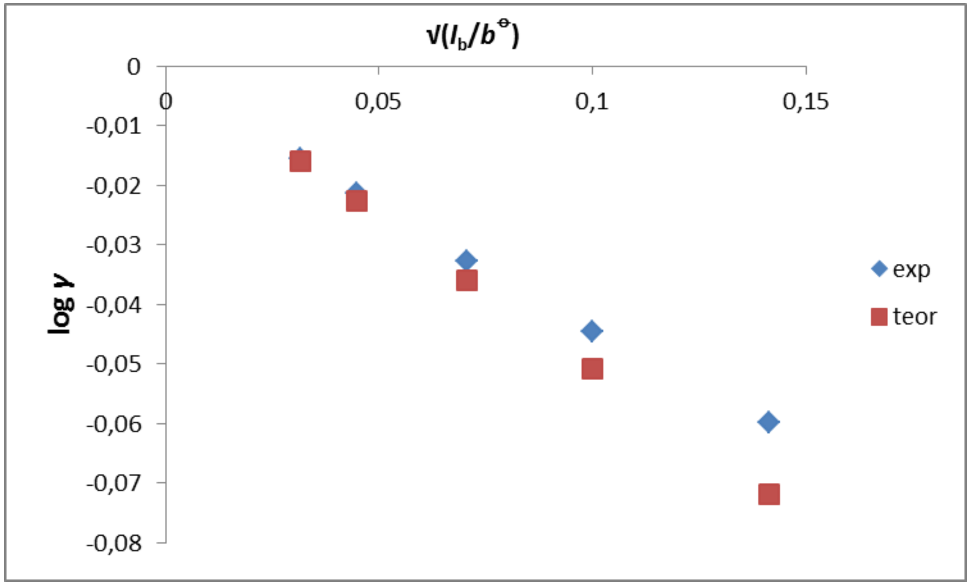
$\frac{b}{\text{mol kg}^{-1}}$	0,001	0,002	0,005	0,01	0,02
$(\overline{\gamma}_{\pm})_{\text{exp}}$	0,9649	0,9519	0,9275	0,9024	0,8712

DHL

$$-\log \gamma_{\pm} = \frac{\left|z_{+}z_{-}\right| \cdot A_{b} \cdot \sqrt{I_{b} / b^{\ominus}}}{1 + \sqrt{I_{b} / b^{\ominus}}}$$

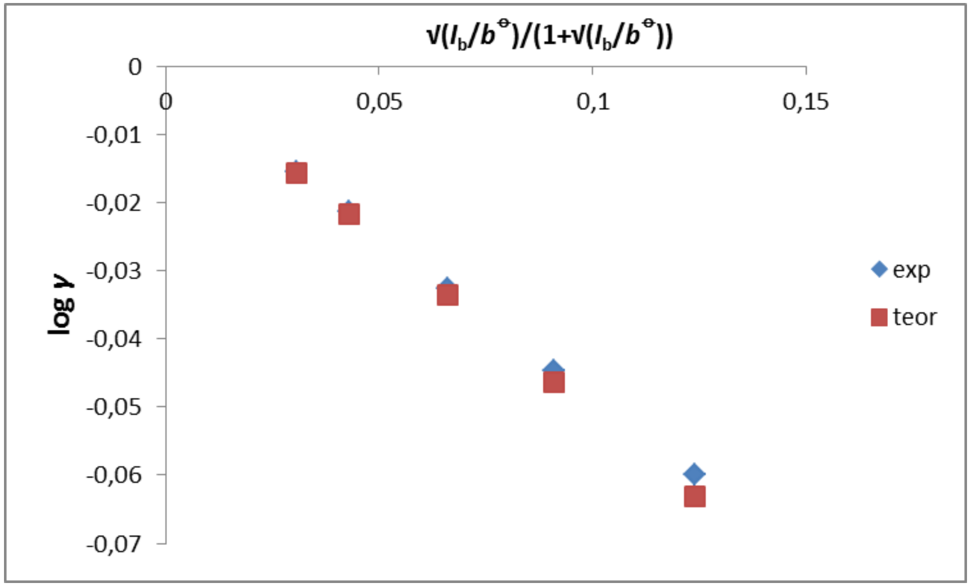
DHLL

$$-\log \gamma_{\pm} = \left|z_{+}z_{-}\right| \cdot A_{b} \cdot \sqrt{I_{b} / b^{\ominus}}$$


$\surd(I_b/b^{\ominus})$
0
0,05
0,1
0,15
-0,01
-0,02
-0,03
-0,04
-0,05
-0,06
-0,07
-0,08
log γ
exp
teor

DHLL

DHL


$\surd(I_b/b^{\ominus})/(1+\surd(I_b/b^{\ominus}))$
0
0,05
0,1
0,15
-0,01
-0,02
-0,03
-0,04
-0,05
-0,06
-0,07
log γ
exp
teor

2. Izračunajte koncentracijsku konstantu ionizacije octene kiseline u vodenoj otopini koja sadrži veliki suvišak KCl koncentracije c = 0,1 mol dm^{-3} s obzirom na octenu kiselinu čija koncentracija iznosi 1 · 10^{-4} mol dm^{-3}. Standardna konstanta ionizacije octene kiseline pri 25 ^{o}C iznosi 1,753 · 10^{-5}. U računu koristite Debye-Hückelov zakon (DHL) za određivanje prosječnih koeficijenata aktiviteta.

$$-\log \gamma_{\pm} = \frac{\left|z_{+} z_{-}\right| \cdot A \cdot \sqrt{I_c / c^{\ominus}}}{1 + \sqrt{I_c / c^{\ominus}}}$$

$$\left. \begin{array}{l} A_c = 0{,}509 \\ A_b = 0{,}511 \end{array} \right\} \quad A = 0{,}51 \text{ u zadatcima}$$

$$K^{\ominus} = \frac{a(\mathrm{CH_3COO^-}) \cdot a(\mathrm{H^+})}{a(\mathrm{CH_3COOH})} ; a_i = \frac{c_i}{c^{\ominus}} \cdot \gamma_i$$

$$K^{\ominus} = \frac{\left[\mathrm{CH_3COO^-}\right] \cdot \left[\mathrm{H^+}\right]}{\left[\mathrm{CH_3COOH}\right]} \cdot \frac{\gamma(\mathrm{CH_3COO^-}) \cdot \gamma(\mathrm{H^+})}{c^{\ominus} \cdot \gamma(\mathrm{CH_3COOH})}$$

γ = 1 za nenabijene vrste

$$K^{\ominus} = K_c \cdot \frac{\gamma(\mathrm{CH_3COO^-}) \cdot \gamma(\mathrm{H^+})}{c^{\ominus}} = K_c \cdot \frac{\left(\overline{\gamma_{\pm}}\right)^2}{c^{\ominus}}$$

Geometrijski prosjek

$$I_c = \frac{1}{2}\left(c(K^+) + c(\mathrm{Cl}^-)\right) = c(\mathrm{KCl}) = 0{,}1\,\mathrm{mol\ dm^{-3}}$$

c(KCl) >> c(CH_3COOH)
Zanemariv doprinos octene kiseline ionskoj jakosti otopine

$$-\log \gamma_{\pm} = 0{,}1225$$

$$\gamma_{\pm} = 0{,}754$$

$$K_c = \frac{K^{\ominus} \cdot c^{\ominus}}{\left(\overline{\gamma_{\pm}}\right)^2} = 3{,}083 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{mol\ dm^{-3}}$$

3. Standardna konstanta otapanja (produkt topljivosti) AgI u vodi pri 25 ^{o}C iznosi $8{,}568 \cdot 10^{-17}$. Primijenite Debye-Hückelov granični zakon (DHLL) i izračunajte topljivost AgI u vodenoj otopini $AgNO_3$ koncentracije 5 mol m^{-3} pri 25 °C i tlaku od 1 bar.

$$\mathrm{AgI(s)} \rightleftarrows \overset{x}{\mathrm{Ag^{+}(aq)}} + \overset{x}{\mathrm{I^{-}(aq)}}$$

U čistoj vodi ili prisustvu elektrolita koji ne utječe na navedenu ravnotežu: topljivost je jednaka koncentraciji jedne ili druge ionske vrste, odnosno x

$c(\mathrm{AgNO_3})$ x $\qquad$ x + $c(\mathrm{AgNO_3})$ >> x

$$\mathrm{AgI(s)} \rightleftarrows \mathrm{Ag^+(aq)} + \mathrm{I^-(aq)}$$

U prisustvu elektrolita koji sadrži zajednički kation ili anion, odnosno dolazi do pomaka ravnoteže ulijevo: topljivost je jednaka koncentraciji vrste koje ima manje u otopini

$$K_s^{\ominus} = \frac{a(\mathrm{Ag^+})\cdot a(\mathrm{I^-})}{\boxed{a(\mathrm{AgI})}} = \frac{c(\mathrm{Ag^+})\cdot c(\mathrm{I^-})}{\left(c^{\ominus}\right)^2}\cdot\boxed{\left(\overline{\gamma_{\pm}}\right)^2} = \frac{c(\mathrm{AgNO_3})\cdot c(\mathrm{I^-})}{\left(c^{\ominus}\right)^2}\cdot\left(\overline{\gamma_{\pm}}\right)^2$$

Po definiciji jednako 1

Geometrijski prosjek koeficijenata aktiviteta ionskih vrsta u ravnoteži (sudionika reakcije)

Topljivost = x = $c(\mathrm{I}^-)$

$$x = \frac{K_s^\ominus \cdot \left(c^\ominus\right)^2}{c(\mathrm{AgNO_3}) \cdot \left(\overline{\gamma_\pm}\right)^2}$$

$$-\log\overline{\gamma_\pm} = \left|\underset{\overset{\uparrow}{\mathrm{AgI}}}{z_+ z_-}\right| \cdot A \cdot \sqrt{\underset{\overset{\uparrow}{\mathrm{AgNO_3}}}{I_c} / c^\ominus}$$

$$\overline{\gamma_\pm} = 0{,}920$$

$x = 2{,}02 \cdot 10^{-14}\ \mathrm{mol\ dm^{-3}}$

4. Standardna konstanta otapanja $Cu_3(PO_4)_2$ u vodi pri 25 °C iznosi 1,37 · 10^{-37}. Izračunajte topljivost $Cu_3(PO_4)_2$.

$$\begin{array}{ccc} & 3\,x & 2\,x \\ Cu_3(PO_4)_2(s) \rightleftarrows & 3\,Cu^{2+}(aq) + & 2\,PO_4^{\;3-}(aq) \end{array}$$

$$K_s^{\ominus} = \frac{a^3(Cu^{2+})\cdot a^2(PO_4^{\;3-})}{a(Cu_3(PO_4)_2)} = \frac{c^3(Cu^{2+})}{\left(c^{\ominus}\right)^3}\cdot\gamma^3(Cu^{2+})\cdot\frac{c^2(PO_4^{\;3-})}{\left(c^{\ominus}\right)^2}\cdot\gamma^2(PO_4^{\;3-})$$

$$\left(\overline{\gamma_{\pm}}\right)^5 = \gamma^3(Cu^{2+})\cdot\gamma^2(PO_4^{\;3-})$$

$I_c \rightarrow 0;\ \gamma = 1$

$$K_s^{\ominus} = \frac{(3x)^3 \cdot (2x)^2}{\left(c^{\ominus}\right)^5} = \frac{108 \cdot x^5}{\left(c^{\ominus}\right)^5}$$

$$x = \sqrt[5]{\frac{K_s^{\ominus} \cdot \left(c^{\ominus}\right)^5}{108}} = 1{,}66 \cdot 10^{-8}\ \text{mol dm}^{-3}$$

5. Izračunajte elektromotivnost članka

$Mg(s)\ |\ Mg^{2+}(aq,\ a = 1 \cdot 10^{-3})\ ||\ H^{+}(\ aq,\ a = 1)\ |\ H_2(g,\ p = 1\ \text{bar})\ |\ Pt(s)$ pri 25 °C.

$E^{\ominus}(Mg^{2+}\ |\ Mg) = -2{,}363\ \text{V}$

$E^{\ominus}(H^{+}\ |\ H_2) = 0\ \text{V}$ ←

Dogovorno se svi standardni redukcijski potencijali definiraju u odnosu na standardni redukcijski potencijal vodika

$$\text{A(O): } Mg\ (s) \rightarrow Mg^{2+}(aq) + \boxed{2\ e^{-}}$$

$$\text{K(R): } 2\ H^{+}(aq) + \boxed{2\ e^{-}} \rightarrow H_2(g)$$

– – – – – – – – – – – – – – – – – – – –

$$Mg\ (s) + 2\ H^{+}(aq) \rightarrow Mg^{2+}(aq) + H_2(g)$$

$z = 2$ → broj izmijenjenih elektrona po jediničnoj pretvorbi (gledamo ukupnu reakciju)

Elektromotivnost članka (ukupna reakcija):
razlika elektromotivnosti katode i anode

$p(\mathrm{H_2})/p^{\ominus} = 1$

$$E = (E_K^{\ominus} - E_A^{\ominus}) - \frac{RT}{zF}\ln\frac{a(\mathrm{Mg}^{2+})\cdot a(\mathrm{H_2})}{a(\mathrm{Mg})\cdot a^2(\mathrm{H}^+)}$$

Po definiciji 1

Zadano: $a = 1$

$$E = +2{,}363\ \mathrm{V} - \frac{RT}{zF}\ln(1\cdot 10^{-3})$$

$F = 96\,485\ \mathrm{C\ mol^{-1}}$

$$E = 2{,}452\ \mathrm{V}$$

6. Izračunajte elektromotivnost članka:

$Cd(s)\ |\ Cd(NO_3)_2(aq)\ ||\ KBr(aq)\ |\ AgBr(s)\ |\ Ag(s)$

pri 25 °C. Molalitet otopine KBr iznosi 0,05 mol kg^{-1}, a molalitet otopine $Cd(NO_3)_2$ iznosi 0,01 mol kg^{-1}. Koristite Debye-Hückelov zakon za određivanje ionskih koeficijenata aktiviteta.

$$E^{\ominus}\left(\mathrm{Cd}^{2+}\,|\,\mathrm{Cd}\right) = -0,40\ \mathrm{V}$$

$$E^{\ominus}(\mathrm{AgBr,Br^-}\,|\,\mathrm{Ag}) = 0,07\ \mathrm{V}$$

Kod elektrokemijskih članaka koristit ćemo ionske koeficijente aktiviteta redoks aktivnih vrsta!

$$-\log\gamma_i = \frac{z_i^2\cdot A\cdot\sqrt{I_c/c^{\ominus}}}{1+\sqrt{I_c/c^{\ominus}}}$$

Iz topljive soli

$$\text{A(O): Cd (s)} \rightarrow \text{Cd}^{2+}\text{(aq)} + 2\ \text{e}^-$$

$$\text{K(R): AgBr(s)} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag(s) + Br}^-\text{(aq)}$$

pomnožiti s 2 i zbrojiti s gornjom jednadžbom; *z* = 2

– – – – – – – – – – – – – – – – – – – –

$$\text{Cd (s) + 2 AgBr(s)} \rightarrow \text{Cd}^{2+}\text{(aq) + 2 Ag(s)} + 2\ \text{Br}^-\text{(aq)}$$

Reakciju pišemo s redoks aktivnom vrstom u nedisociranom obliku (slabo topljiva sol)

1

$$E = (E_K{}^{\ominus} - E_A{}^{\ominus}) - \frac{RT}{zF}\ln\frac{a(\text{Cd}^{2+})\cdot a^2(\text{Ag})\cdot a(\text{Br}^-)}{a(\text{Cd})\cdot a^2(\text{AgBr})}$$

1

$$E=(E_K^{\ominus}-E_A^{\ominus})-\frac{RT}{zF}\ln\left[\frac{b(\mathrm{Cd}^{2+})}{b^{\ominus}}\cdot\gamma(\mathrm{Cd}^{2+})\cdot\frac{b^2(\mathrm{Br}^-)}{\left(b^{\ominus}\right)^2}\cdot\gamma^2(\mathrm{Br}^-)\right]$$

Ionske jakosti korištene za izračun pojedinih koeficijenata aktiviteta – paziti na sastav elektrolita za svaki polučlanak!

Cd^{2+} u otopini $Cd(NO_3)_2$

$$I_b=\frac{1}{2}\left(4\cdot b(\mathrm{Cd}^{2+})+b(\mathrm{NO_3}^-)\right)=\frac{1}{2}\left(4\cdot b(\mathrm{Cd(NO_3)_2})+2\,b(\mathrm{Cd(NO_3)_2})\right)$$

$$=3\,b\,\mathrm{Cd(NO_3)_2}=0{,}03\,\mathrm{mol\ kg}^{-1}$$

$$-\log\gamma(\mathrm{Cd}^{2+})=\frac{4\cdot 0{,}51\sqrt{0{,}03}}{1+\sqrt{0{,}03}}=0{,}301$$

$$\gamma(\mathrm{Cd}^{2+})=0{,}500$$

Br^- u otopini KBr

$$I_b = b(\text{KBr}) = 0{,}05\,\text{mol kg}^{-1}$$

$$-\log\gamma(\text{Br}^-) = \frac{1\cdot 0{,}51\sqrt{0{,}05}}{1+\sqrt{0{,}05}} = 0{,}093$$

$$\gamma(\text{Br}^-) = 0{,}807$$

E = 0,62 V

7. Izračunajte pH vodene otopine fosfatnog pufera pri 25 °C koji sadrži jednake koncentracije Na_2HPO_4 i NaH_2PO_4 (c = 0,025 mol dm^{-3}). Koristite Debye-Hückelov zakon za određivanje ionskih koeficijenata aktiviteta.

$K_{a,2} = 6{,}34 \cdot 10^{-8}$ mol dm^{-3}

$$\text{pH} = -\log a(\text{H}^+) = -\log \frac{c(\text{H}^+)}{c^{\ominus}} \cdot \gamma(\text{H}^+)$$

$$\text{H}_2\text{PO}_4^{-}\ (\text{aq}) \rightleftarrows \text{H}^+ (\text{aq}) + \text{HPO}_4^{2-} (\text{aq})$$

$$K_{a,2} = \frac{\left[\text{H}^+\right] \cdot \left[\text{HPO}_4^{2-}\right]}{\left[\text{H}_2\text{PO}_4^{-}\right]} \rightarrow \left[\text{H}^+\right] = K_{a,2} \cdot \frac{\overbrace{\left[\text{H}_2\text{PO}_4^{-}\right]}^{\approx c(\text{NaH}_2\text{PO}_4)}}{\underbrace{\left[\text{HPO}_4^{2-}\right]}_{\approx c(\text{Na}_2\text{HPO}_4)}} = K_{a,2}$$

$$-\log \gamma_i = \frac{z_i^2 \cdot A \cdot \sqrt{I_c / c^{\ominus}}}{1 + \sqrt{I_c / c^{\ominus}}}$$

$$I_c = \frac{1}{2}\left(c(\mathrm{Na}^+) + 4 \cdot c(\mathrm{HPO_4}^{2-}) + c(\mathrm{Na}^+) + c(\mathrm{H_2PO_4}^-) \right)$$
$$= \frac{1}{2}\left(2\, c(\mathrm{Na_2HPO_4}) + 4 \cdot c(\mathrm{Na_2HPO_4}) + c(\mathrm{NaH_2PO_4}) + c(\mathrm{NaH_2PO_4}) \right)$$
$$= 3\, c(\mathrm{Na_2HPO_4}) + c(\mathrm{NaH_2PO_4}) = 0{,}1\,\mathrm{mol\ dm^{-3}}$$

$$-\log \gamma(\mathrm{H}^+) = \frac{1 \cdot 0{,}51\sqrt{0{,}1}}{1 + \sqrt{0{,}1}} = 0{,}1225$$

$$\gamma(\mathrm{H}^+) = 0{,}754$$

pH = 7,32

8. Ukupna koncentracija fosfata u obliku $H_2PO_4^-$ (aq) i HPO_4^{2-}(aq) u nekoj otopini iznosi $1\cdot10^{-3}$ mol dm^{-3}. Ako pH otopine iznosi 7,40, kolike su koncentracije pojedinih fosfatnih oblika u otopini? pK_{a2} = 7,21. Pretpostavite idealno ponašanje otopine.

$$K_{a,2}=\frac{\left[\mathrm{H}^+\right]\cdot\left[\mathrm{HPO_4}^{2-}\right]}{\left[\mathrm{H_2PO_4}^-\right]}$$

$$\frac{\left[\mathrm{HPO_4}^{2-}\right]}{\left[\mathrm{H_2PO_4}^-\right]}=\frac{K_{a,2}}{\left[\mathrm{H}^+\right]}$$

Idealno ponašanje – koef. aktiviteta jednak 1

$$\mathrm{pH} = -\log\frac{c(\mathrm{H}^+)}{c^{\ominus}}$$

$$\frac{\left[\mathrm{HPO_4}^{2-}\right]}{\left[\mathrm{H_2PO_4}^-\right]}=\frac{K_{a,2}}{\left[\mathrm{H}^+\right]}=\frac{10^{-\mathrm{p}K_{a,2}}\cdot c^{\ominus}}{10^{-\mathrm{pH}}\cdot c^{\ominus}}=10^{\mathrm{pH}-\mathrm{p}K_{a,2}}=1,5488$$

$$\left[HPO_4^{\;2-}\right] = 1{,}5488 \cdot \left[H_2PO_4^{\;-}\right]$$

$$\left[HPO_4^{\;2-}\right] + \left[H_2PO_4^{\;-}\right] = 1 \cdot 10^{-3}\ \text{mol dm}^{-3}$$

$$-----------------------$$

$$\left[H_2PO_4^{\;-}\right] = 3{,}92 \cdot 10^{-4}\ \text{mol dm}^{-3}$$

$$\left[HPO_4^{\;2-}\right] = 6{,}08 \cdot 10^{-4}\ \text{mol dm}^{-3}$$

9. Izračunajte standardnu reakcijsku entalpiju i entropiju te Gibbsovu energiju pri 293 K za reakciju u elektrokemijskom članku: Pt(s) | H_2(g) | HCl(aq) | Hg_2Cl_2(s) | Hg(l).

Standardna elektromotivnost članka pri 293 K iznosi 0,2699 V, a pri 303 K iznosi 0,2669 V.

(pretpostavite da su u zadanom temperaturnom području standardna reakcijska entalpija i entropija konstantne).

Kolika je elektromotivnost navedenog članka pri 293 K ako je tlak vodika 1 bar, a pH vodene otopine HCl jednak 2?

$$\text{A(O)}: \mathrm{H_2\ (g)} \rightarrow 2\ \mathrm{H^+(aq)} + 2\ \mathrm{e^-}$$

$$\text{K(R)}: \mathrm{Hg_2Cl_2(s)} + 2\ \mathrm{e^-} \rightarrow 2\ \mathrm{Hg\ (l)} + 2\ \mathrm{Cl^-(aq)}$$

$$\mathrm{H_2(g)} + \mathrm{Hg_2Cl_2\ (s)} \rightarrow 2\ \mathrm{H^+(aq)} + 2\ \mathrm{Cl^-(aq)} + 2\ \mathrm{Hg(l)}$$

Ovisnost standardne elektromotivnosti članka o temperaturi

$$\Delta_r G^\ominus = -zFE^\ominus = \Delta_r H^\ominus - T\Delta_r S^\ominus$$

$$E^\ominus = \boxed{-\frac{\Delta_r H^\ominus}{zF}} + \boxed{\frac{\Delta_r S^\ominus}{zF}} \cdot T$$

nagib

odsječak
na y-osi

U slučaju više podataka
$E^\ominus(T)$ crtati graf

T_1 = 293 K; $E_1^{\ominus}$ = 0,2699 V
T_2 = 303 K; $E_2^{\ominus}$ = 0,2669 V

Ako izračunamo jednadžbu pravca kroz 2 točke:

$E^{\ominus} = (-\,3\cdot10^{-4}\ \mathrm{V\ K^{-1}})\cdot T + 0{,}3578\ \mathrm{V}$

Nagib = „temperaturni koeficijent”

$$\frac{\Delta_r S^{\ominus}}{zF} = -3\cdot10^{-4}\ \mathrm{V\ K^{-1}}$$

$$\Delta_r S^{\ominus} = -3\cdot10^{-4}\ \mathrm{V\ K^{-1}}\cdot 2\cdot 96485\ \mathrm{C\ mol^{-1}}$$

$$= \ -57{,}9\ \mathrm{J\ K^{-1}mol^{-1}}$$

odsječak
na y-osi

$$-\frac{\Delta_r H^{\ominus}}{zF} = 0{,}3578\ \mathrm{V}$$

$$\Delta_r H^{\ominus} = -2\cdot 96485\ \mathrm{C\ mol^{-1}}\cdot 0{,}3578\ \mathrm{V} = -69045\ \mathrm{J\ mol^{-1}}$$

$$= -69{,}04\ \mathrm{kJ\ mol^{-1}}$$

$$\Delta_r G^{\ominus}(293\ \mathrm{K}) = -zFE^{\ominus}(293\ \mathrm{K}) = -52{,}1\ \mathrm{kJ\ mol^{-1}}$$

$$E = (E_K^{\ominus} - E_A^{\ominus}) - \frac{RT}{zF}\ln\frac{a^2(\mathrm{H^+})\cdot a^2(\mathrm{Cl^-})\cdot a^2(\mathrm{Hg})}{a(\mathrm{H_2})\cdot a(\mathrm{Hg_2Cl_2})}$$

1

$p(\mathrm{H_2})/p^{\ominus} = 1$

$$E = \underbrace{(E_K^{\ominus} - E_A^{\ominus})}_{E^{\ominus}\ (293\ \mathrm{K})} - \frac{RT}{zF}\ln(a^2(\mathrm{H^+})\cdot a^2(\mathrm{Cl^-}))$$

$$a(\mathrm{H^+}) = a(\mathrm{Cl^-}) = 10^{-\mathrm{pH}} = 10^{-2}$$

E = 0,502 V

10. Odredite standardnu Gibbsovu energiju i entalpiju stvaranja fumaratnog iona (F^{2-}) pri 298 K koristeći sljedeće podatke:

	$\Delta_f G^\ominus$ (298 K) / kJ mol^{-1}	$\Delta_f H^\ominus$ (298 K) / kJ mol^{-1}
sukcinat (S^{2-})	–690,44	–908,68
acetaldehid (A)	–139,08	–210,66
etanol (E)	–181,75	–287,02

Temperaturni koeficijent za proces $F^{2-} + E \rightarrow S^{2-} + A$ iznosi - $3{,}46 \cdot 10^{-5}$ V K^{-1}, a standardni elektrodni potencijali reakcija:

$F^{2-} + 2H^+ + 2e^- \rightarrow S^{2-}$ $E^\ominus = 0{,}031$ V

$A + 2H^+ + 2e^- \rightarrow E$ $E^\ominus = -0{,}197$ V

Obje reakcije napisane kao redukcija (tablice standardnih redukcijskih potencijala)! Katoda je uvijek ona elektroda s višim redukcijskim potencijalom, a kod druge elektrode (anode) se zapravo reakcija događa u suprotnom smjeru.

K(R): $F^{2-} + 2\ H^+ + 2\ e^- \rightarrow S^{2-}$

A(O): $E \rightarrow A + 2\ H^+ + 2\ e^-$

– – – – – – – – – – – – – – – – – – –

$F^{2-} + E \rightarrow S^{2-} + A$

Oduzimanje tabličnih vrijednosti koje su navedene isključivo za reakciju redukcije; taj minus već uključuje obrnuti predznak potencijala za suprotnu reakciju na anodi

$$E^\ominus(298\ \mathrm{K}) = \overbrace{E_K^\ominus - E_A^\ominus} = 0{,}031\ \mathrm{V} - (-0{,}197\ \mathrm{V}) = 0{,}228\ \mathrm{V}$$

$$E^\ominus = -\frac{\Delta_r H^\ominus}{zF} + \frac{\Delta_r S^\ominus}{zF} \cdot T$$

Nagib = „temperaturni koeficijent”

$$\frac{\Delta_r S^\ominus}{zF} = -3{,}46 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{V\ K^{-1}}$$

$$\Delta_r H^{\ominus} = -zF\left(E^{\ominus} - \frac{\Delta_r S^{\ominus}}{zF}\cdot T\right) = -45987 \text{ J mol}^{-1}$$

$$= -45{,}987 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\Delta_r G^{\ominus}(298 \text{ K}) = -zFE^{\ominus}(298 \text{ K}) = -43{,}997 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\Delta_r H^{\ominus} = \Delta_\mathrm{f} H^{\ominus}(\mathrm{S}^{2-}) + \Delta_\mathrm{f} H^{\ominus}(\mathrm{A}) - \Delta_\mathrm{f} H^{\ominus}(\mathrm{F}^{2-}) - \Delta_\mathrm{f} H^{\ominus}(\mathrm{E})$$

$$\Delta_\mathrm{f} H^{\ominus}(\mathrm{F}^{2-}) = -786{,}3 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\Delta_r G^{\ominus} = \Delta_\mathrm{f} G^{\ominus}(\mathrm{S}^{2-}) + \Delta_\mathrm{f} G^{\ominus}(\mathrm{A}) - \Delta_\mathrm{f} G^{\ominus}(\mathrm{F}^{2-}) - \Delta_\mathrm{f} G^{\ominus}(\mathrm{E})$$

$$\Delta_\mathrm{f} G^{\ominus}(\mathrm{F}^{2-}) = -603{,}8 \text{ kJ mol}^{-1}$$