

## Ćwiczenie nr 3

# TERMODYNAMIKA OGNIWA GALWANICZNEGO

## I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie zmian funkcji termodynamicznych dla reakcji biegnącej w ogniwie Clarka.

## II. Zagadnienia wprowadzające

1. Ogniwo, siła elektromotoryczna, pomiar SEM.
2. Budowa ogniwa Clarka.
3. Praca ogniwa, związek siły elektromotorycznej ogniwa z funkcjami termodynamicznymi.
4. Równanie Gibbsa-Helmholtza.
5. Energia i entalpia swobodna.

### Literatura obowiązuująca:

1. P.W. Atkins, „Podstawy chemii fizycznej”, PWN, 1999.
1. Praca zbiorowa, „Chemia fizyczna”, PWN, 2001.
2. L. Sobczyk, A. Kisza, „Eksperymentalna chemia fizyczna”, PWN, 1982.
3. E. Szymański, „Ćwiczenia laboratoryjne z chemii fizycznej”, cz. 1, Wyd. UMCS Lublin, 1991.

### III. Część teoretyczna

#### III. 1. Energia swobodna i entalpia swobodna

Dla procesu odwracalnego, prowadzonego w stałej temperaturze, różniczka entropii układu ( $dS$ ) jest związana z elementarnym ciepłem przemiany ( $Q_{el}$ ) i temperaturą następującą zależnością:

$$dS = \frac{Q_{el}}{T} \quad (1)$$

Z równania I zasady termodynamiki wynika, że  $Q_{el} = dU - W_{el}$  zatem, podstawiając to do równania (1) otrzymujemy:

$$dS = \frac{dU - W_{el}}{T} \quad (2)$$

Po przekształceniu równanie (2) można napisać w postaci:

$$dU - T dS = W_{el} \quad (3)$$

lub, zakładając stałość temperatury ( $dT = 0$ ):

$$d(U - TS) = W_{el} \quad (4)$$

Funkcję występującą w nawiasie oznacza się literą  $F$ :

$$F = U - TS \quad (5)$$

i nazywa się ją **energią swobodną** lub **funkcją Helmholtza**. Ponieważ  $U$  i  $S$  są funkcjami stanu, zatem funkcja  $F$  jest nią również. Stosując takie oznaczenie można równanie (4) napisać w postaci:

$$dF = W_{el} = -p dV + W'_{el} \quad (6)$$

gdzie  $W'_{el}$  oznacza pracę nieobjętościową. Z równania tego wynika, że w odwracalnej przemianie izotermicznej zmiana energii swobodnej układu jest równa pracy, towarzyszącej tej przemianie.

Równanie (6) można zapisać w nieco innej formie:

$$dF + p dV = W'_{el} \quad (7)$$

Jeśli proces odwracalny przebiega w sposób izotermiczny i dodatkowo izobaryczny ( $p = \text{const}$ ,  $dp = 0$ ) to równanie (7) przybiera postać:

$$d(F + pV) = W'_{el} \quad (8)$$

Otrzymaliśmy w ten sposób kolejną funkcję stanu, którą oznacza się literą  $G$ :

$$G = F + pV \quad (9)$$

Nosi ona nazwę **entalpii swobodnej** lub **funkcji Gibbsa**. Stosując to oznaczenie równanie (8) można krótko zapisać:

$$dG = W'_{el} \quad (10)$$

Z równania (10) wynika, że w przemianie izotermiczno-izobarycznej, prowadzonej odwracalnie, zmiana entalpii swobodnej jest równa pracy nieobjętościowej, towarzyszącej przemianie.

### III.2. Równanie Gibbsa i Helmholtza

Entalpię swobodną można zdefiniować również w inny sposób. Podstawiając do równania (9) za  $F$  wyrażenie z równania (5) otrzymujemy:

$$G = U - TS + pV \quad (11)$$

Ponieważ  $U + pV$  jest z definicji entalpią ( $H$ ), zatem:

$$G = H - TS \quad (12)$$

Ze związków między funkcjami termodynamicznymi wynika, że:

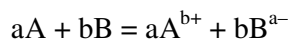
$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p = -S \quad (13)$$

Podstawiając to za  $S$  do równania (12) otrzymujemy równanie **Gibbsa i Helmholtza**:

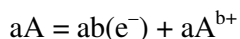
$$G = H + T\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p \quad (14)$$

### III.3. Ogniwo galwaniczne

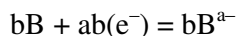
**Ogniwo galwaniczne** to urządzenie, w którym wytwarza się prąd elektryczny kosztem przebiegającej w nim reakcji utleniania i redukcji, którą w najprostszym przypadku można przedstawić za pomocą schematu:



Jednak w ogniwie reakcja redox zostaje rozdzielona na reakcje składowe: utlenienia:



oraz redukcji:



przy czym każda z nich zachodzi w oddzielnej części ogniwa, zwanej **półogniwem**. Półogniwo, w którym zachodzi reakcja utlenienia nosi nazwę **anody**, a to, w którym zachodzi redukcja – **katody**.

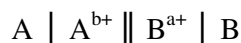
Można zatem powiedzieć, że **ogniwo galwaniczne jest układem dwóch półogniw**.

Aby jednak obie reakcje mogły zachodzić jednocześnie, czyli ogniwo było w stanie wytwarzać prąd, musi być zapewniony przepływ elektronów z jednego półogniwa do drugiego, oraz jonów pomiędzy półogniwami. Mówiąc inaczej, musi być zamknięty zarówno obwód zewnętrzny, jak i wewnętrzny.

Przepływ elektronów zapewniają **elektrody** oraz łączący je przewód elektryczny. Elektrody są rodzajem sondy, wprowadzonej do półogniwa, której zadaniem jest doprowadzanie do niego lub odprowadzanie z niego elektronów, biorących udział w reakcji utlenienia bądź redukcji. Muszą one być wykonane z dobrego przewodnika prądu oraz pozostawać w kontakcie z reakcją, przebiegającą w półogniwie. W przypadku półogniw metalicznych elektrodę stanowi blaszka metaliczna, będąca zarazem reagentem reakcji.

Przepływ jonów zapewnia zastosowanie klucza elektrolitycznego, łączącego elektrolity w obu półogniwach, lub rzadziej przegrody porowatej.

Ogniwo galwaniczne przedstawia się często za pomocą schematu, umieszczając po lewej stronie półogniwo o niższym potencjale. Ogniwo, w którym zachodzą zapisane wyżej reakcje można zatem zapisać:



gdzie pojedyncze kreski oznaczają granicę faz (najczęściej metal – roztwór) a dwie równoległe granicę między elektrolitami (najczęściej jest to klucz elektrolityczny).

### III. 4. Siła elektromotoryczna

Napięcie ogniwa ( $U$ ), czyli różnica potencjałów obu elektrod, zależy od natężenia pobieranego z niego prądu. Im to natężenie mniejsze, tym napięcie staje się coraz większe, osiągając wartość maksymalną, gdy natężenie prądu wynosi 0, czyli ogniwo nie pracuje. Tę maksymalną wartość napięcia dla niepracującego ogniwa, czyli ogniwa w stanie równowagi termodynamicznej, nazywa się **siłą elektromotoryczną (SEM)** i oznacza najczęściej symbolem  $E$ .

Siły elektromotorycznej ogniwa nie można zmierzyć bezpośrednio za pomocą woltomierza, gdyż podłączenie go do ogniwa powoduje przepływ prądu i narusza stan jego równowagi. Stosuje się zatem takie metody, które nie powodują przepływu prądu. Do najczęściej stosowanych należy **metoda kompensacyjna Poggendorfa**.

Obecnie coraz częściej stosuje się do pomiaru SEM urządzenia automatyczne, posiadające wbudowane układy kompensujące, lub mierniki cyfrowe.

### III. 5. Związek SEM z funkcjami termodynamicznymi

Ogniwo galwaniczne jest urządzeniem, które może służyć do wykonywania pewnej pracy użytecznej, nie związanej ze zmianą objętości. Jak uczy fizyka, pracę przeniesienia ładunku  $Q$  w polu elektrycznym o różnicy potencjałów  $U$  można wyrazić wzorem:

$$W = Q \cdot U \quad (15)$$

W przypadku ogniwa praca związana jest z przebiegającą w nim reakcją redox. Przyjmując, że przereagują stechiometryczne ilości reagentów oraz, że tej stechiometrycznej reakcji towarzyszy przepływ przez obwód zewnętrzny z moli elektronów, wielkość ładunku wyniesie  $zF$ , gdzie  $F$  oznacza stałą Faradaya. Jeśli ogniwo jest dodatkowo w stanie równowagi termodynamicznej, to napięcie  $U$  jest równe sile elektromotorycznej. Wówczas praca maksymalna, która może być wykonana przez ogniwo, czyli ujemna z punktu widzenia układu, wyniesie:

$$W = -zFE \quad (16)$$

Z drugiej strony wiadomo, że zmiana entalpii swobodnej ( $\Delta G$ ) jest dla procesów izotermiczno-izobarycznych, prowadzonych w sposób odwracalny, równa pracy nieobjętościowej, towarzyszącej tej przemianie, a zatem:

$$\Delta G = -zFE \quad (17)$$

Wyrażając siłę elektromotoryczną w voltach, a stałą Faradaya w kulombach, otrzymujemy wartość entalpii swobodnej w dżulach.

Entalpię reakcji, zachodzącej w ogniwie, można powiązać z siłą elektromotoryczną, korzystając z równania Gibbsa i Helmholtza (14). Ponieważ zmiana entalpii swobodnej jest równa różnicy entalpii swobodnej w stanie końcowym i początkowym ( $\Delta G = G_k - G_p$ ), a równanie stosuje się zarówno do  $G_k$ , jak i do  $G_p$ , możemy zapisać go w postaci:

$$\Delta G = \Delta H + T \left( \frac{\partial \Delta G}{\partial T} \right)_p \quad (18)$$

Przekształcając to równanie i wstawiając za  $\Delta G$  wartość z równania (17) otrzymujemy:

$$\Delta H = -zFE - T \left( \frac{\partial (-zFE)}{\partial T} \right)_p = -zFE + zFT \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_p \quad (19)$$

i ostatecznie:

$$\Delta H = -zF \left[ E - T \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_p \right] \quad (20)$$

Zmianę entropii w procesie odwracalnym można obliczyć następująco:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (21)$$

W procesie izobarycznym zmiana entalpii równa jest ciepłu procesu, o ile nie występuje praca nieobjętościowa. W ogniwie praca taka pojawia się i jest ona równa zmianie entalpii swobodnej (równanie 10). Zatem zmiana entalpii wynosi w tym przypadku:

$$\Delta H = Q + W' = Q + \Delta G \quad (22)$$

Zatem

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} \quad (23)$$

Ze wzoru (18) wynika, że:

$$\Delta H - \Delta G = -T \left( \frac{\partial \Delta G}{\partial T} \right)_p = -T \left( \frac{\partial (-zFE)}{\partial T} \right)_p = zFT \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_p \quad (24)$$

Po odstawieniu tego wyrażenia do wzoru (23) otrzymujemy wyrażenie na zmianę entropii w ogniwie galwanicznym:

$$\Delta S = zF \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_p \quad (25)$$

## IV Część doświadczalna

### A. Aparatura i odczynniki

1. Aparatura:
  - ogniwo Clarka,
  - ultratermostat,
  - termometr kontaktowy,
  - woltmierz cyfrowy.
2. Odczynniki:
  - rtęć, (cz.d.a.),
  - $\text{Hg}_2\text{SO}_4$ , (cz.d.a.),
  - Zn, (cz.d.a.),
  - $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (cz.d.a.).

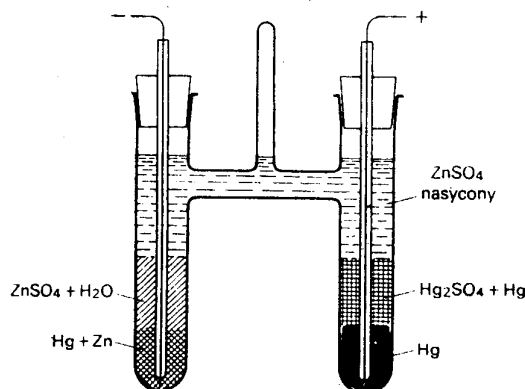
### B. Przygotowanie termostatu

Przed przystąpieniem do wykonywania pomiarów należy uruchomić termostat. W tym celu należy:

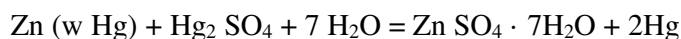
- włączyć zasilanie termostatu,
- ustawić niewielki przepływ wody,
- na termometrze kontaktowym ustawić żądaną temperaturę,
- pokrętelem na obudowie termostatu uruchomić mieszadło oraz grzałki (zgodnie ze wskazówkami prowadzącego ćwiczenie).

### C. Wykonanie pomiarów SEM

Schemat ogniwa Clarka przedstawia poniższy rysunek.



Zachodzi w nim następująca reakcja potencjałotwórcza:



W celu wyznaczenia zmian funkcji termodynamicznych dla tej reakcji potrzebna jest znajomość zależności SEM od temperatury. W tym celu należy:

- ustawić na termostacie temperaturę 25°C (temperatura pokojowa),
- odczekać około 0,5 godz. do ustalenia się równowagi termodynamicznej,
- odczytać wartość SEM.

Podobną procedurę należy powtórzyć dla temperatur 30, 35, 40 i 45°C.

#### D. Opracowanie wyników

Wyniki pomiarów przedstawić w tabeli:

$t$ [°C]	$T$ [K]	$E$ [V]

Otrzymane wyniki przedstawić w postaci wykresu  $E = f(T)$ . Zależność ta ma postać funkcji liniowej:

$$E = aT + b \quad (26)$$

Współczynniki  $a$  i  $b$  należy wyznaczyć metodą najmniejszych kwadratów, która została omówiona w „Dodatku” na końcu skryptu.

Do obliczeń współczynników kierunkowych prostej wygodnie jest się posłużyć tabelą pomocniczą:

$T_i$	$T_i^2$	$E_i$	$E_i T_i$
298			
303			
308			
313			
318			
$\Sigma$			

Znając zależność SEM od temperatury obliczamy zmiany swobodnej entalpii dla każdej badanej temperatury, korzystając z zależności (17)

$$\Delta G = -zFE = -2 \cdot 96500(aT + b) \quad [\text{J/mol}] \quad (27)$$

Wartość zmian pozostałych funkcji termodynamicznych obliczamy z zależności (20) i (24), oraz z liniowej zależności  $E$  od  $T$  (równanie 26):

$$\Delta H = -zF \left[ E - T \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_p \right] = -zF \left[ E - T \left( \frac{\partial (aT + b)}{\partial T} \right)_p \right] = -zF(E - aT) \quad [\text{J/mol}] \quad (28)$$



oraz

$$\Delta S = zF \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_p = zF \left( \frac{\partial (aT + b)}{\partial T} \right)_p = zFa \quad [\text{J/mol} \cdot \text{deg}] \quad (29)$$

Wartości zmian tych funkcji należy obliczyć dla wszystkich badanych temperatur.

Na podstawie znaku zmian entalpii swobodnej ocenić, czy proces przebiegający w ogniwie jest samorzutny, czy nie.