

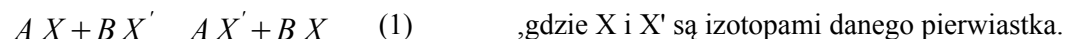
Wydział FiIS	1. Mikołaj Graczyk 2. Karolina Nowosad		Rok III	Grupa VII	Zespół III
<b>Pracownia Izotopowa WFiIS</b>	Temat: Kinetyka wymiany izotopowej w układzie homogenicznym.				Nr ćwiczenia 11
Data wykonania 06.05.2015	Data oddania 22.06.2015	Zwrot do popr.	Data oddania	Data zaliczenia	OCENA

## 0. Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z metodą izotopową wykorzystywaną do badania kinetyki wymiany izotopowej w układzie homogenicznym i jej mechanizmami.

## 1. Wstęp teoretyczny

**Reakcja wymiany izotopowej**, to taka reakcja chemiczna, w czasie której izotopowe atomy określonego pierwiastka zamieniają się miejscami pomiędzy dwiema lub więcej cząsteczkami, w których występuje ten pierwiastek.



,gdzie X i X' są izotopami danego pierwiastka.

Gdy cząsteczki, pomiędzy którymi zachodzi wymiana znajdują się w różnych fazach mamy do czynienia z wymianą w **układzie heterogenicznym**, gdy w tych samych - z wymianą w **układzie homogenicznym**.

Wymiana izotopowa nie prowadzi do zwykłych, chemicznych zmian układu. W idealnej wymianie izotopowej zakłada się chemiczną identyczność wszystkich izotopów wymieniającego się pierwiastka.

Wobec tego istnieje potrzeba uzasadnienia termodynamicznych przyczyn tego procesu. Każdy samorzutnie biegnący proces prowadzi do zmniejszenia entalpii swobodnej układu:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (2)$$

,gdzie G – entalpia swobodna  
H – entalpia  
S – entropia  
T – temperatura

Wyrażenie na entalpię swobodną układu dla dwóch stanów różniących się rozdziałem izotopów przyjmuje postać:

$$G_1 = H_1 - TS_1 \quad (3)$$

$$G_2 = H_2 - TS_2 \quad (4)$$

Zmiana entalpii swobodnej przy przejściu od stanu 1 do stanu 2 wyniesie:

$$\Delta G = (H_2 - TS_2) - (H_1 - TS_1) \quad (5)$$

Ponieważ dla reakcji wymiany izotopowej  $H_1 \approx H_2$ , więc  $\Delta G \approx -T \Delta S \quad (6)$

Samorzutność reakcji jest wynikiem tendencji układu do osiągnięcia maksimum entropii. Przy równomiernym rozdzielaniu izotopów pomiędzy reagentami entropia jest zawsze większa, niż gdy ich rozkład jest nierównomierny dlatego  $\Delta S > 0$ , a więc zgodnie z równaniem (6)  $\Delta G < 0$ , co warunkuje samorzutność wymiany.

### Charakterystyczne cechy wymiany izotopowej

- efekt cieplny reakcji wymiany u wszystkich pierwiastków (z wyjątkiem wodoru) jest znikomo mały,
- stała równowagi K reakcji wymiany izotopowej jest bliska jedności dla wszystkich pierwiastków z wyjątkiem wodoru i nie zależy od temperatury. Wynika to z izobary van't Hoffa,
- energia aktywacji reakcji prostej i odwrotnej są sobie równe. Efekt cieplny dowolnej reakcji

- odwracalnej jest równy różnicy energii reakcji prostej i odwrotnej,
- stałe szybkości  $k$  reakcji prostej i odwrotnej są sobie równe,
- reakcje wymiany izotopowej nie prowadzą do zmian stężeń uczestniczących w nich związków chemicznych.

### Mechanizmy reakcji wymiany izotopowej

- mechanizm dysocjacyjny,
- mechanizm asocjacyjny,
- wymiana izotopowa zachodząca w wyniku przejścia elektronów.

## 2. Układ pomiarowy

W skład układu pomiarowego wchodzi:

- zestaw pomiarowy z licznikiem scyntylicyjnym,
- domek pomiarowy,
- termostat wodny,
- szkło laboratoryjne (zlewki, mieszadła, kolumny),
- szklane i automatyczne pipety o różnych objętościach.

Odczynniki wykorzystane podczas ćwiczenia:

- roztwór NaI w alkoholu absolutnym (7g NaI/100 cm<sup>3</sup> alkoholu),
- roztwór Na<sup>131</sup>I w alkoholu absolutnym,
- jodek etylu C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>I.

## 3. Metody pomiaru

W pierwszej kolejności zmierzono tło 8 naczynek pomiarowych (wyniki zamieszczono w tabeli 1).

Następnie sporządzono roztwór aktywny. Do 64 cm<sup>3</sup> NaI w alkoholu absolutnym (niepewność 0,2 cm<sup>3</sup>) dodano kilka kropel roztworu Na<sup>131</sup>I w alkoholu absolutnym i zamieszano. Pobrano próbkę do naczynka y<sub>0</sub>, resztę przelano do słoika i dodano 8 cm<sup>3</sup> jodku etylu (niepewność 0,1 ml) i wymieszano. Włączono stoper. Z otrzymanego roztworu pobrano 15 cm<sup>3</sup> (niepewność 0,5 ml) i podgrzewano (do momentu wrzenia) przez 15 minut.

Do zimnej wody w zlewkach pobierano ze słoika po 8 lub 10 cm<sup>3</sup> roztworu odpowiednio po 10, 25, 40, 55, 70 minutach, każdą z osobna zamieszano.

Kolejno zlano fazę wodną do pojemnika na odpady promieniotwórcze. Jodek etylu z pozostałą fazą wodną przelano do probówek, delikatnie odciągnięto pipetą resztkę fazy wodnej, przepłukano kilkoma cm<sup>3</sup> wody. W celu zabezpieczenia jodku etylu przed parowaniem dodano do niego po 1-2 cm<sup>3</sup> wody. Z każdej z próbek pobrano po 0,5 cm<sup>3</sup> (niepewność 10%) do naczynek pomiarowych i zmierzono częstość zliczeń.

Podgrzany roztwór ostudzone i postąpiono z nim dokładnie tak samo, jak z wcześniej opisanymi próbkami pobieranymi w odstępach czasowych.

## 4. Wyniki pomiarów

**tabela 1**

Zestawienie wyników pomiarów tła.

l.p.	area	u(area)	integral
$y_0$	0	0	75
10	87	26,36	242
25	299	8,57	424
40	373	7,02	484
55	318	7,37	399
70	300	8,81	440
$\infty$	485	5,76	588

**tabela 2**

Zestawienie wyników pomiaru właściwego.

l.p.	area	u(area)	integral
$y_0$	18775	0,85	21172
10	13737	0,99	15352
25	32781	0,63	36114
40	44241	0,54	48769
55	53329	0,49	58755
70	64661	0,44	70971
$\infty$	107387	0,35	118602

**tabela 3**

Zestawienie wyników pomiarów z wyliczonymi niepewnościami dla tła, pomiaru właściwego oraz pomiaru właściwego z uwzględnieniem tła.

l.p.	$N_t$	$u(N_t)$	$N_i$	$u(N_i)$	$N_i - N_t$	$u(N_i - N_t)$
$y_0$	0,0	0,0	18775	137	18775	137
10	87,0	9,3	13737	117	13650	118
25	299	17	32781	181	32482	182
40	373	19	44241	210	43868	211
55	318	18	53329	231	53011	232
70	300	17	64661	254	64361	255
$\infty$	485	22	107387	328	106902	328

$N_t$  – liczba zliczeń tła

$N_i$  – liczba zliczeń pomiaru właściwego

$N_i - N_t$  – liczba zliczeń pomiaru właściwego z uwzględnieniem tła

**tabela 4**

Zestawienie wyników wyliczeń stopnia wymiany, wraz z wartościami potrzebnymi do wyrysowania wykresu.

l.p.	F	u(F)	$-\ln(1-F)$	$u(-\ln(1-F))$	t
$y_0$	-	-	-	-	-
10	0,1277	0,0012	0,1366	0,0013	10
25	0,3038	0,0019	0,3622	0,0028	25
40	0,4104	0,0023	0,5282	0,0040	40
55	0,4959	0,0026	0,6849	0,0053	55
70	0,6021	0,0030	0,9214	0,0076	70
$\infty$	1,0000	0,0043	-	-	$\infty$

## 5. Opracowanie wyników

Wszystkie niepewności zawarte w podpunktach punktu 5 (z wyłączeniem punktu 5.1, gdzie zostało to osobno opisane) zostały wyliczone z prawa przenoszenia niepewności.

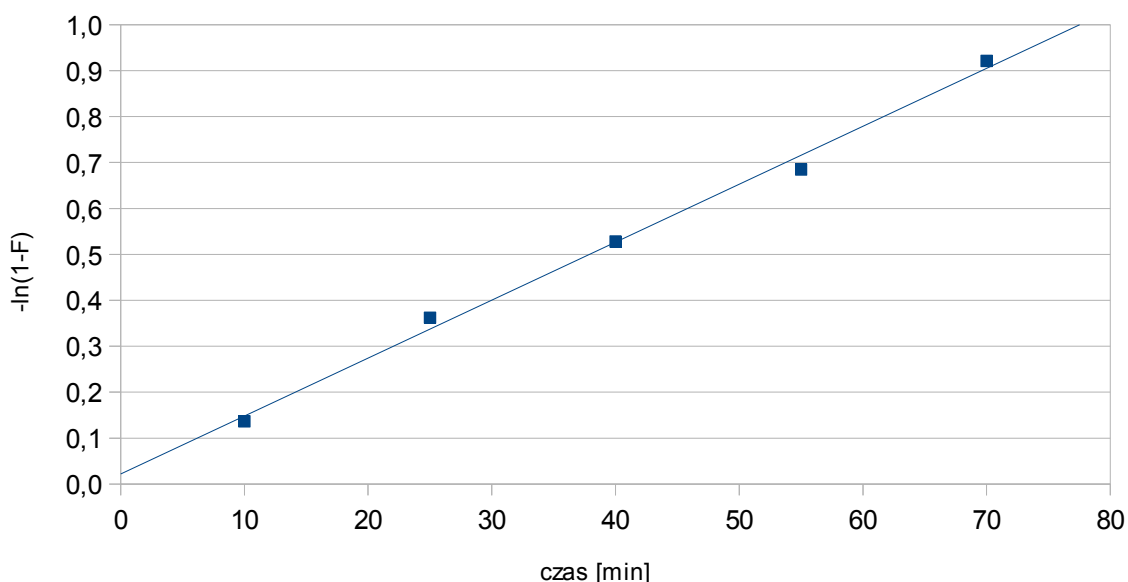
### 5.1. Zależność $-\ln(1-F) = f(t)$

Stopień wymiany  $F$  wyznaczono ze wzoru  $F = \frac{N_i}{N_\infty}$  (7), natomiast jego niepewność wyznaczono z prawa przenoszenia niepewności.

$$u(F) = \sqrt{\left[ \frac{\delta F}{\delta N_\infty} \cdot u(N_\infty) \right]^2 + \left[ \frac{\delta F}{\delta N_i} \cdot u(N_i) \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{-N_i}{(N_\infty)^2} \cdot u(N_\infty) \right]^2 + \left[ \frac{1}{N_\infty} \cdot u(N_i) \right]^2}$$

Niepewność  $-\ln(1-F)$  również wyliczono z prawa przenoszenia niepewności

$$u(-\ln(1-F)) = \sqrt{\left[ \frac{\delta f(t)}{\delta F} \cdot u(F) \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{-1}{1-F} \cdot u(F) \right]^2}$$



**wykres 1.** Zależność  $-\ln(1-F)$  od czasu wraz z dopasowaną prostą regresji.

równanie prostej regresji:  $f(t) = 0,01262t - 0,022$  (8)

współczynniki prostej regresji:  $A = 0,01262 \frac{1}{min}$   
 $B = 0,022$

niepewności współczynników:  $u(A) = 0,00054 \frac{1}{min}$   
 $u(B) = 0,024$

### 5.2. Stężenie $a, b$

Wyznaczone w punkcie 5.1. współczynniki prostej regresji wykorzystano do analizy stężeń substratów i produktów reakcji wymiany jaka zaszła w badanym roztworze. Zależność  $f(t) = -\ln(1-F)$  przedstawia równanie Mc'Kaya w pełnej postaci danej wzorem (9).

$$-\ln(1-F) = \frac{a+b}{a \cdot b} \cdot rt \quad (9)$$

Przekształcając równanie do postaci (10) odczytano wartość współczynnika A (11).

$$-\ln(1-F) = A \cdot t \quad (10)$$

$$A = \frac{a+b}{a \cdot b} \cdot r \quad (11)$$

Przekształcając dalej otrzymano wzór na szybkość wymiany r (12).

$$r = \frac{A \cdot a \cdot b}{a+b} \quad (12)$$

Wartości a i b są powiązane ze stężeniami substratów oraz produktów reakcji wymiany w następujący sposób:

$$a = [C_2H_5I] + [C_2H_5^{131}I] \quad (13)$$

$$b = [Na^{131}I] + [NaI] \quad (14)$$

Wzór na stężenie molowe ma postać  $C_m = \frac{n}{V_r} \left[ \frac{mol}{dm^3} \right]$  (15), przy czym n jest liczbą moli substancji liczoną ze wzoru  $n = \frac{\rho V}{M}$  (16), a  $V_r$  objętością w jakiej znajduje się substancja.

Objętości poszczególnych roztworów oraz ich niepewności.

$$V_{C_2H_5I} = 8,0 \text{ cm}^3$$

$$u(V_{C_2H_5I}) = 0,1 \text{ cm}^3$$

$$V_{NaI} = 64 \text{ cm}^3 - 0,5 \text{ cm}^3 = 63,50 \text{ cm}^3$$

$$u(V_{NaI}) = \sqrt{(0,05)^2 + (0,2)^2} = 0,21 \text{ cm}^3$$

$$V_r = V_{NaI} + V_{C_2H_5I} = 71,50 \text{ cm}^3$$

$$u(V_r) = \sqrt{(u(V_{NaI}))^2 + (u(V_{C_2H_5I}))^2} = 0,23 \text{ cm}^3$$

Znając objętości poszczególnych roztworów wyliczono stężenia a i b oraz ich niepewności.

$$a = \frac{n_{C_2H_5I}}{V_r} = \frac{\rho_{C_2H_5I} V_{C_2H_5I}}{V_r M_{C_2H_5I}} = \frac{1,93 \frac{g}{cm^3} \cdot 8 \text{ cm}^3}{71,5 \text{ cm}^3 \cdot 156 \frac{g}{mol}} = 1,384 \cdot 10^{-3} \frac{mol}{cm^3} = 1,384 \text{ M}$$

$$\begin{aligned} u(a) &= \sqrt{\left[ \frac{\delta a}{\delta V_r} \cdot u(V_r) \right]^2 + \left[ \frac{\delta a}{\delta V_{C_2H_5I}} \cdot u(V_{C_2H_5I}) \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{-\rho_{C_2H_5I} V_{C_2H_5I}}{(V_r)^2 \cdot M_{C_2H_5I}} \cdot u(V_r) \right]^2 + \left[ \frac{\rho_{C_2H_5I}}{V_r \cdot M_{C_2H_5I}} \cdot u(V_{C_2H_5I}) \right]^2} \\ &= \sqrt{\left[ \frac{-1,93 \frac{g}{cm^3} \cdot 8,0 \text{ cm}^3}{(71,50 \text{ cm}^3)^2 \cdot 156 \frac{g}{mol}} \cdot 0,23 \right]^2 + \left[ \frac{1,93 \frac{g}{cm^3}}{71,50 \text{ cm}^3 \cdot 156 \frac{g}{mol}} \cdot 0,1 \text{ cm}^3 \right]^2} = 0,018 \cdot 10^{-3} \frac{mol}{cm^3} = 0,018 \text{ M} \end{aligned}$$

$$b = \frac{n_{C_{NaI}}}{V_r} = \frac{\rho_{NaI} V_{NaI}}{V_r M_{NaI}} = \frac{0,07 \frac{g}{cm^3} \cdot 63,5 cm^3}{71,5 cm^3 \cdot 154 \frac{g}{mol}} = 0,404 \cdot 10^{-3} \frac{mol}{cm^3} = 0,404 M$$

$$u(b) = \sqrt{\left[ \frac{\delta b}{\delta V_r} \cdot u(V_r) \right]^2 + \left[ \frac{\delta b}{\delta V_{NaI}} \cdot u(V_{NaI}) \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{-\rho_{NaI} V_{NaI}}{(V_r)^2 \cdot M_{NaI}} \cdot u(V_r) \right]^2 + \left[ \frac{\rho_{NaI}}{V_r \cdot M_{NaI}} \cdot u(V_{NaI}) \right]^2} =$$

$$= \sqrt{\left[ \frac{-0,07 \frac{g}{cm^3} \cdot 63,50 cm^3}{(71,50 cm^3)^2 \cdot 154 \frac{g}{mol}} \cdot 0,23 \right]^2 + \left[ \frac{0,07 \frac{g}{cm^3}}{71,50 cm^3 \cdot 154 \frac{g}{mol}} \cdot 0,21 cm^3 \right]^2} = 0,019 \cdot 10^{-3} \frac{mol}{cm^3} = 0,019 M$$

### 5.3. Szybkość wymiany $r$

Mając wyznaczone współczynniki  $a$  i  $b$  (podpunkt 5.1), wyliczono szybkość wymiany  $r$  wg wzoru (12) oraz jej niepewność.

$$r = \frac{A \cdot a \cdot b}{a + b} = \frac{0,01262 \frac{1}{min} \cdot 1,384 M \cdot 0,404 M}{1,384 M + 0,404 M} = 3,95 \cdot 10^{-3} \frac{mol}{min \cdot dm^3}$$

$$u(r) = \sqrt{\left[ \frac{\delta r}{\delta A} \cdot u(A) \right]^2 + \left[ \frac{\delta r}{\delta a} \cdot u(a) \right]^2 + \left[ \frac{\delta r}{\delta b} \cdot u(b) \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{a \cdot b}{a + b} \cdot u(A) \right]^2 + \left[ \frac{A \cdot b^2}{(a + b)^2} \cdot u(a) \right]^2 + \left[ \frac{A \cdot a^2}{(a + b)^2} \cdot u(b) \right]^2} =$$

$$= \sqrt{\left[ \frac{1,384 \frac{mol}{dm^3} \cdot 0,404 \frac{mol}{dm^3}}{1,384 \frac{mol}{dm^3} + 0,404 \frac{mol}{dm^3}} \cdot 0,00054 \frac{1}{min} \right]^2 + \left[ \frac{0,01262 \frac{1}{min} \cdot \left( 0,404 \frac{mol}{dm^3} \right)^2}{\left( 1,384 \frac{mol}{dm^3} + 0,404 \frac{mol}{dm^3} \right)^2} \cdot 0,018 \frac{mol}{dm^3} \right]^2 +$$

$$+ \left[ \frac{0,01262 \frac{1}{min} \cdot \left( 1,384 \frac{mol}{dm^3} \right)^2}{\left( 1,384 \frac{mol}{dm^3} + 0,404 \frac{mol}{dm^3} \right)^2} \cdot 0,019 \frac{mol}{dm^3} \right]^2} = 0,22 \cdot 10^{-3} \frac{mol}{min \cdot dm^3}$$

### 5.4. Stała szybkości wymiany

Bazując na wyznaczonej szybkości wymiany  $r$ , oraz na wzorze  $r = k \cdot a \cdot b$  (17), a dokładniej na jego przekształcenia do postaci (18), wyznaczono stałą szybkości wymiany oraz jej niepewność.

$$k = \frac{r}{a \cdot b} = \frac{3,9 \cdot 10^{-3} \frac{mol}{min \cdot dm^3}}{1,384 \frac{mol}{dm^3} \cdot 0,404 \frac{mol}{dm^3}} = 6,98 \cdot 10^{-3} \frac{dm^3}{min \cdot mol} \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
u(k) &= \sqrt{\left[\frac{\delta k}{\delta r} \cdot u(r)\right]^2 + \left[\frac{\delta k}{\delta a} \cdot u(a)\right]^2 + \left[\frac{\delta k}{\delta b} \cdot u(b)\right]^2} = \sqrt{\left[\frac{1}{a \cdot b} \cdot u(r)\right]^2 + \left[\frac{-r}{a^2 \cdot b} \cdot u(a)\right]^2 + \left[\frac{-r}{a \cdot b^2} \cdot u(b)\right]^2} = \\
&= \sqrt{\left[\frac{1}{1,384 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} \cdot 0,404 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3}} \cdot 0,22 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{min} \cdot \text{dm}^3}\right]^2 + \left[\frac{-3,9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{min} \cdot \text{dm}^3}}{\left(1,384 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3}\right)^2} \cdot 0,018 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3}\right]^2 +} \\
&+ \left[\frac{-3,9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{min} \cdot \text{dm}^3}}{1,384 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} \cdot \left(0,404 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3}\right)^2} \cdot 0,019 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3}\right]^2} = 0,52 \cdot 10^{-3} \frac{\text{dm}^3}{\text{min} \cdot \text{mol}}
\end{aligned}$$

### 5.5. Czas połowicznej wymiany $t_{1/2}$

Czas połowicznej wymiany oznacza taką wartość na osi czasu, dla której  $F = 1/2$ . W celu jej wyliczenia przekształcono wzór (9) do postaci (19).

$$-\ln(1-F) = \frac{a+b}{a \cdot b} \cdot r \cdot t \quad (9)$$

$$t = \frac{a \cdot b \cdot (-\ln(1-F))}{(a+b)r} \quad (19)$$

$$t_{1/2} = \frac{a \cdot b \cdot \left(-\ln\left(1 - \frac{1}{2}\right)\right)}{(a+b)r} = \frac{1,384 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} \cdot 0,404 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} \cdot \left(-\ln\left(\frac{1}{2}\right)\right)}{\left(1,384 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} + 0,404 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3}\right) \cdot 3,95 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{min} \cdot \text{dm}^3}} = 54,9 \text{ min}$$

$$\begin{aligned}
u(t_{1/2}) &= \sqrt{\left[\frac{\delta t_{1/2}}{\delta a} \cdot u(a)\right]^2 + \left[\frac{\delta t_{1/2}}{\delta b} \cdot u(b)\right]^2 + \left[\frac{\delta t_{1/2}}{\delta r} \cdot u(r)\right]^2} = \\
&= \sqrt{\left[\frac{b^2 \left(-\ln\left(1 - \frac{1}{2}\right)\right)}{(a+b)^2 \cdot r} \cdot u(a)\right]^2 + \left[\frac{a^2 \left(-\ln\left(1 - \frac{1}{2}\right)\right)}{(a+b)^2 \cdot r} \cdot u(b)\right]^2 + \left[\frac{r - a \cdot b \cdot \left(-\ln\left(1 - \frac{1}{2}\right)\right)}{(a+b) \cdot r^2} \cdot u(r)\right]^2} = \\
&= \sqrt{\left[\frac{\left(0,404 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3}\right)^2 \left(-\ln\left(1 - \frac{1}{2}\right)\right)}{\left(1,384 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} + 0,404 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3}\right)^2 \cdot 3,95 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{min} \cdot \text{dm}^3}} \cdot 0,018 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3}\right]^2 +} \\
&+ \left[\frac{\left(1,384 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3}\right)^2 \left(-\ln\left(1 - \frac{1}{2}\right)\right)}{\left(1,384 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} + 0,404 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3}\right)^2 \cdot 3,95 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{min} \cdot \text{dm}^3}} \cdot 0,019 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3}\right]^2 +} \\
&+ \left[\frac{-1,384 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} \cdot 0,404 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} \cdot \left(-\ln\left(1 - \frac{1}{2}\right)\right)}{\left(1,384 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} + 0,404 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3}\right) \cdot \left(3,95 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{min} \cdot \text{dm}^3}\right)^2} \cdot 0,22 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{min} \cdot \text{dm}^3}\right]^2} = 3,7 \text{ min}
\end{aligned}$$

### 5.6. Bilans znacznika

$$\begin{aligned} 0,5 \text{ cm}^3 &- 18775 \text{ zliczeń} \\ 64 \text{ cm}^3 &- y \text{ zliczeń} \end{aligned}$$

$$y = \frac{64 \text{ cm}^3 \cdot 18775 \text{ zliczeń}}{0,5 \text{ cm}^3} = \mathbf{2\,403\,200 \text{ zliczeń}}$$

$$\begin{aligned} u(y) &= \sqrt{\left[ \frac{\delta y}{\delta y_0} \cdot u(y_0) \right]^2 + \left[ \frac{\delta y}{\delta V_{64}} \cdot u(V_{64}) \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{V_{64}}{V_{0,5}} \cdot u(y_0) \right]^2 + \left[ \frac{y_0}{V_{0,5}} \cdot u(V_{64}) \right]^2} = \\ &= \sqrt{\left[ \frac{64 \text{ cm}^3}{0,5 \text{ cm}^3} \cdot 137 \text{ zliczeń} \right]^2 + \left[ \frac{18775 \text{ zliczeń}}{0,5 \text{ cm}^3} \cdot 0,2 \text{ cm}^3 \right]^2} = \mathbf{19\,076 \text{ zliczeń}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0,5 \text{ cm}^3 &- 106902 \text{ zliczeń} \\ 8 \text{ cm}^3 &- x \text{ zliczeń} \end{aligned}$$

$$x = \frac{8 \text{ cm}^3 \cdot 106902 \text{ zliczeń}}{0,5 \text{ cm}^3} = \mathbf{1\,710\,432 \text{ zliczeń}}$$

$$\begin{aligned} u(x) &= \sqrt{\left[ \frac{\delta x}{\delta x_\infty} \cdot u(x_\infty) \right]^2 + \left[ \frac{\delta x}{\delta V_{C_2H_5I}} \cdot u(V_{C_2H_5I}) \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{V_{C_2H_5I}}{V_{0,5}} \cdot u(x_\infty) \right]^2 + \left[ \frac{x_\infty}{V_{0,5}} \cdot u(V_{C_2H_5I}) \right]^2} = \\ &= \sqrt{\left[ \frac{8 \text{ cm}^3}{0,5 \text{ cm}^3} \cdot 328 \text{ zliczeń} \right]^2 + \left[ \frac{106902 \text{ zliczeń}}{0,5 \text{ cm}^3} \cdot 0,1 \text{ cm}^3 \right]^2} = \mathbf{21\,492 \text{ zliczeń}} \end{aligned}$$

Mając wyliczone wartości x i y, wyznaczono bilans równowagi.

$$\frac{x}{a} = \frac{1\,710\,432}{1,384} = \mathbf{1\,235\,861}$$

$$u\left(\frac{x}{a}\right) = \sqrt{\left[ \frac{1}{a} \cdot u(x) \right]^2 + \left[ \frac{-x}{a^2} \cdot u(a) \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{1}{1,384} \cdot 21\,492 \right]^2 + \left[ \frac{-1\,710\,432}{(1,384)^2} \cdot 0,018 \right]^2} = \mathbf{22\,349}$$

$$\frac{y}{a+b} = \frac{2\,403\,200}{1,384+0,404} = \mathbf{1\,344\,072}$$

$$\begin{aligned} u\left(\frac{y}{a+b}\right) &= \sqrt{\left[ \frac{1}{a+b} \cdot u(y) \right]^2 + \left[ \frac{-y}{(a+b)^2} \cdot u(a) \right]^2 + \left[ \frac{-y}{(a+b)^2} \cdot u(b) \right]^2} = \\ &= \sqrt{\left[ \frac{1}{1,384+0,404} \cdot 19\,076 \right]^2 + \left[ \frac{-2\,403\,200}{(1,384+0,404)^2} \cdot 0,018 \right]^2 + \left[ \frac{-2\,403\,200}{(1,384+0,404)^2} \cdot 0,019 \right]^2} = \mathbf{22\,381} \end{aligned}$$



## 6. Wnioski

- zgodnie z teoretycznymi założeniami, aktywność próbek rośnie liniowo w skali logarytmicznej z niewielkimi niepewnościami współczynników regresji,
- pozostałe wartości obliczone na podstawie pomiarów również mają niskie niepewności co dowodzi, że wszystkie procedury zostały wykonane poprawnie,
- dowodem na to, że układ dąży do osiągnięcia maksimum entropii jest fakt, że pomimo pozornego zatrzymania reakcji poprzez schłodzenie próbek, aktywność w miarę czasu rosła z pewną regularnością,
- bilans równowagi pokazał, że dla większego przybliżenia jest  $\frac{x}{a}$  równe  $\frac{y}{a+b}$ .