

Partiell molar entalpi

Vegard Gjeldvik Jervell, Mats Kulås,
Bendik Støa Sannes og Sverre Dårflot Olsen

19. juni 2019

Sammendrag

I dette forsøket ble blandingsentalpien og de partielle molare entalpiene for KNO_3 og rent vann bestemt, og partielle molare entalpier ved uendelig fortynning ble beregnet. Dette ble gjort ved å måle temperaturendringen ved tilsats av små mengder KNO_3 i vann i et kalorimeter, og bruk av ligninger utledet fra at entalpi er en ekstensiv størrelse. De partielle molare entalpiene til KNO_3 ved uendelig fortynning og rent vann ble beregnet til henholdsvis $34.8 \pm 0.3 \text{ kJ mol}^{-1}$ og $2.1 \pm 0.7 \text{ J mol}^{-1}$. For KNO_3 lå litteraturverdien innenfor ett standardavvik fra beregnet verdi, mens den for rent vann lå utenfor to standardavvik. Avvik kan skyldes at varmekapasiteten til løsningen ble antatt konstant over små temperaturintervaller og mekanisk tap av salt.

Innhold

1	Introduksjon	3
2	Teori	3
3	Eksperimentelt	5
4	Resultater	6
5	Diskusjon	8
6	Konklusjon	9
A	Målinger	11
B	Beregninger	12
C	Usikkerhetsanalyse	16
D	Symbolliste	19

1 Introduksjon

Når et stoff løses i vann vil bindinger mellom molekyler brytes og dannes. Forskjellen på energien lagret i disse bindingene vil avgjøre varmetoning i løsningen. Kunnskap om dette er viktig i blant annet kontroll av industrielle prosesser som foregår i vannløsninger. Fra varmetoning kan blandingsentalpien $\Delta_{\text{mix}}H$ og de partielle molare entalpiene til komponentene som blandes bestemmes. Den partielle molare entalpien for hver komponent beskriver varmetoning i løsningen per mol av komponenten tilsatt. Blandingsentalpien beskriver endring i entalpi som resultat av blanding av komponentene. I dette forsøket skal disse størrelsene bestemmes for KNO_3 og rent vann ved å måle temperaturendringen når små mengder KNO_3 løses i vann i et kalorimeter. Litteraturverdiene for de partielle molare entalpiene er $34.89 \text{ kJ mol}^{-1}$ ^[1] for KNO_3 og 0 J mol^{-1} for rent vann ved standard tilstand.

2 Teori

I et isolert system vil ikke varme utveksles med omgivelsene, og ved konstant trykk vil tilført varme tilsvare entalpiendring. Entalpi H er en ekstensiv størrelse, og i et system med to komponenter vil den være bestemt av mengdene av komponentene 1 og 2:

$$H_{\text{mix}} = n_1 H_1 + n_2 H_2, \quad (2.1)$$

hvor n_i er stoffmengden til komponent i . Ved å definere standardtilstanden for entalpi, H^* , som entalpien til en ren komponent ved 298 K og 1 bar, vil endringen ved blanding av komponentene være gitt ved

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{mix}}H &= n_1(H_1 - H_1^*) + n_2(H_2 - H_2^*) \\ &= n_1\Delta H_1 + n_2\Delta H_2. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Endringen i entalpi ved blanding vil så kunne bestemmes fra temperaturendringer i et isolert system. Ligning (2.1) viser at blandingsentalpien vil være avhengig av mengden av komponentene som blandes. Denne avhengigheten kan beskrives ved

$$d\Delta_{\text{mix}}H = \left(\frac{\partial \Delta_{\text{mix}}H}{\partial n_1} \right)_{T,p,n_2} \cdot dn_1 + \left(\frac{\partial \Delta_{\text{mix}}H}{\partial n_2} \right)_{T,p,n_1} \cdot dn_2. \quad (2.3)$$

Tegn i subscript beskriver her hvilke variabler som holdes konstant under endringer i komponentenes stoffmengder. Hvis stoffmengden til den ene komponenten ikke endres, vil dette forenkles til

$$d(\Delta_{\text{mix}}H)_{n_2} = \left(\frac{\partial \Delta_{\text{mix}}H}{\partial n_1} \right)_{T,p,n_2} \cdot dn_1. \quad (2.4)$$

Faktoren foran dn_1 beskriver varmetoningen til komponent 1 per mol tilsatt ved de gitte betingelsene. Dette er definert som den partielle molare entalprien ΔH_1 til komponent 1. Ved bruk av denne definisjonen kan ligning (2.3) skrives om til

$$d\Delta_{\text{mix}}H = \Delta H_1 dn_1 + \Delta H_2 dn_2. \quad (2.5)$$

For systemer bestående av vann og salt vil de partielle molare entalpiene kunne bestemmes ved små tilsatser av salt til en vannløsning. Blandingsentalpien vil kunne beregnes fra temperaturendringen ved

$$\Delta H = C_p \Delta T_s, \quad (2.6)$$

hvor C_p er løsningsens varmekapasitet og ΔT_s er temperaturendring ved tilsats av salt. Varmekapasiteten kan bestemmes fra

$$C_p = \frac{q}{\Delta T_R}, \quad (2.7)$$

ved å tilsette en kjent mengde varme q . ΔT_R er her temperaturendring fra varmetilførselen. Da C_p endres med sammensetning må den beregnes på nytt for hver tilførsel. Hvis varmen tilføres fra en spenningskilde, kan den beregnes fra

$$q = \frac{U^2 t}{R}, \quad (2.8)$$

hvor U er spenningen, R er motstanden og t er tiden. Ved tilsats av salt i små mengder vil total akkumulert mengde i løsningen være gitt ved

$$n_{\text{salt}}^{\text{akk},k} = \sum_{i=1}^k n_{\text{salt}}^{(i)}. \quad (2.9)$$

$n_{\text{salt}}^{(i)}$ er her saltmengde nummer i . Blandingsentalpien etter salttilsetning nummer k vil derfor være

$$\Delta_{\text{mix}}H^{(k)} = \sum_{i=1}^k \Delta H^{(i)} \quad (2.10)$$

Definisjonen av partiell molar entalpi gir

$$\Delta H_{\text{salt}} = \left(\frac{\partial \Delta_{\text{mix}}H}{\partial n_{\text{salt}}^{\text{akk}}} \right)_{T,p,n_2}. \quad (2.11)$$

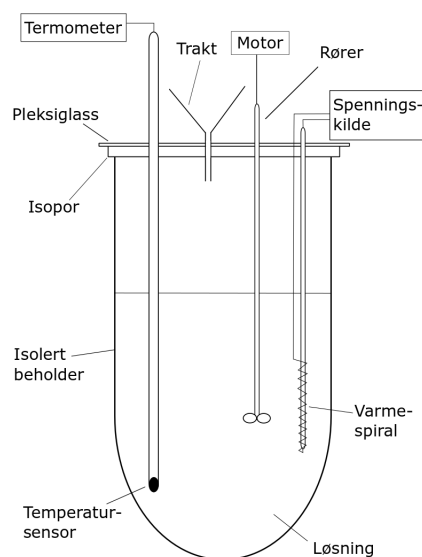
Dette vil tilsvare vinkelkoeffisienten til tangenten av et plott av $\Delta_{\text{mix}}H$ mot $n_{\text{salt}}^{\text{akk}}$. Partiell molar entalpi ved uendelig fortynning, ΔH_{salt}^0 , kan finnes ved ekstrapolering av en lineærregresjon av ΔH_{salt} til 0 mol tilsatt salt. ΔH_{vann} kan så bestemmes for ulike ΔH_{salt} ved å skrive om ligning (2.5)^[2]:

$$\Delta H_{\text{vann}} = \frac{n_{\text{salt}}^{\text{akk}}}{n_{\text{vann}}} \left(\frac{\Delta_{\text{mix}}H}{n_{\text{salt}}^{\text{akk}}} - \Delta H_{\text{salt}} \right). \quad (2.12)$$

3 Eksperimentelt

3.1 Utstyr

Utstyret benyttet i forsøket er vist i figur 3.1. Systemet består av en løsning i en isolert beholder med lokk av isopor med pleksiglassbelegg. En temperatursensor, en rører og en varmespiral er ført gjennom lokket og ned i løsningen. I tillegg har lokket et hull til tilførsel av salt, der en trakt settes når saltet skal tilføres, og det ellers står en propp. Varmespiralen er koblet til en spenningskilde. Røreren er koblet til en motor. Temperatursensoren er koblet til et termometer.



Figur 3.1: Skematisk fremstilling av utstyrsoppsettet benyttet i forsøket.

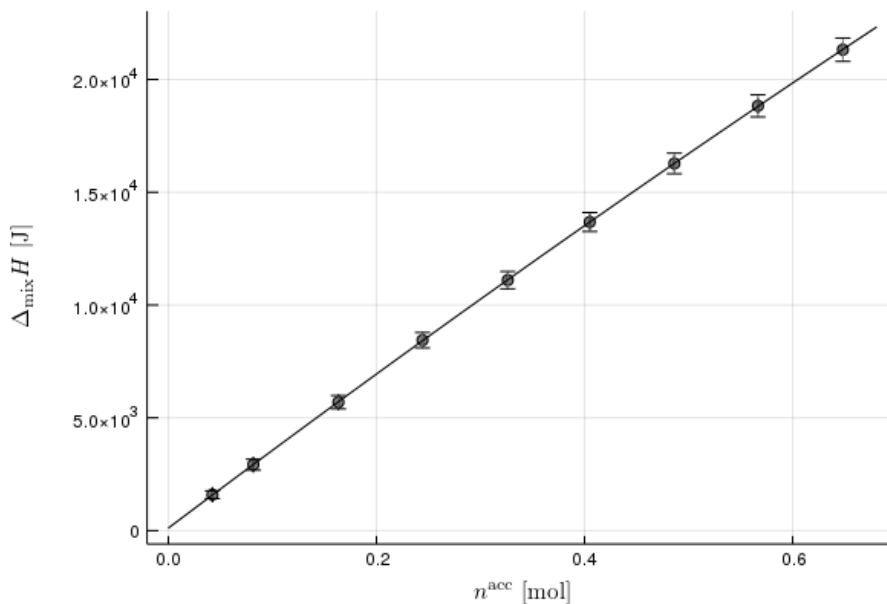
3.2 Utførelse

Vekten til 9 plastbegre ble målt på analysevekt. Nummer 1 og 2 ble fylt med 4 g KNO_3 . Resten ble fylt med 8 g KNO_3 . 1000 cm³ destillert vann ble fylt kalorimeteret. Apparaturen ble så satt sammen som beskrevet i seksjon 3.1. Rører og termometer ble så slått på, og temperaturen i løsningen ble avlest. Saltporsjon 1 ble tilført gjennom trakt, proppen ble satt inn, og temperaturen i løsningen ble avlest etter mellom 20 og 30 sekunder, da den hadde stabilisert deg. Dette ble repetert for saltporsjon 2. Spenningskilden ble så slått på i 60 sekunder, og temperaturen i løsningen ble lest av da den hadde stabilisert seg. Salt og strøm ble så tilsatt vekselvis for resterende saltporsjoner, og temperatur ble målt etter

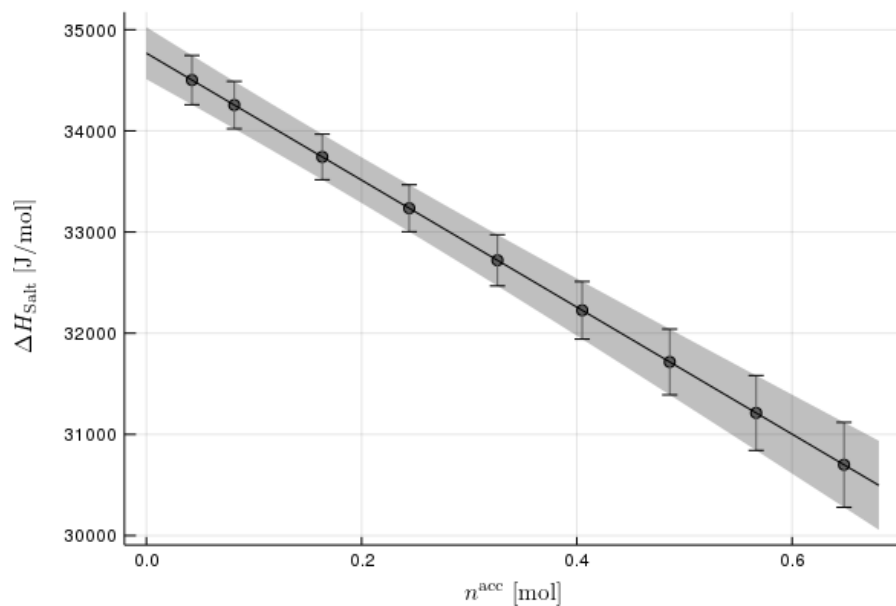
hver tilførsel. Plastbergene ble så veid på nytt, og trykk og temperatur i rommet ble målt.

4 Resultater

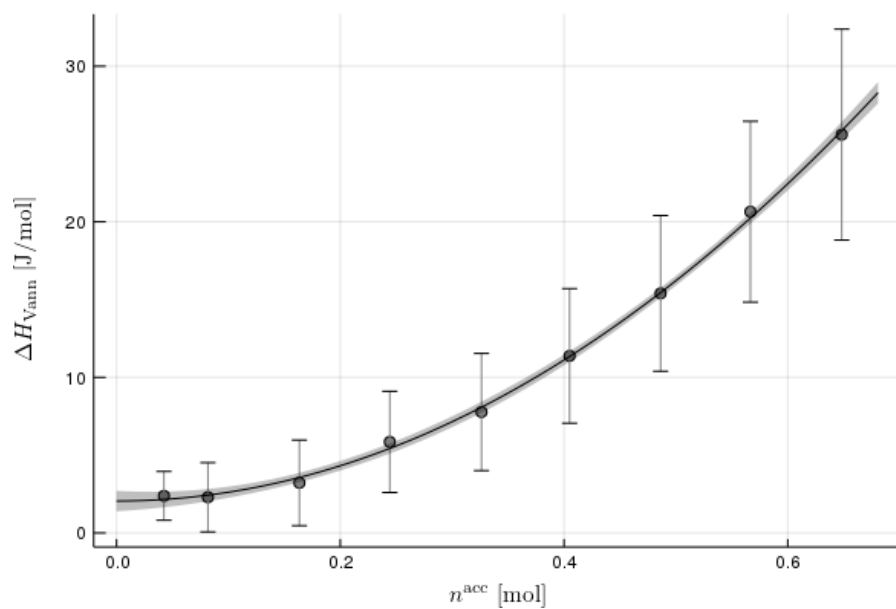
Blandingsentalpi er plottet mot total mengde tilsatt kaliumnitrat i figur 4.1 og tilpasset med en andregradsregresjon. Partielle molare entalpier for salt og vann er plottet i figur 4.2 og 4.3. Partiell molar entalpi for kaliumnitrat ved uendelig fortynning, ΔH_{salt}^0 , er funnet ved ekstrapolasjon av kurven i figur 4.2 til 0 mol tilsatt salt. Den ble bestemt til $34.8 \pm 0.3 \text{ kJ mol}^{-1}$. Partiell molar entalpi ved uendelig fortynning for vann, ΔH_{vann}^0 ble på lik måte funnet til å være $2.1 \pm 0.7 \text{ J mol}^{-1}$. I figur 4.1, 4.2 og 4.3 er feilskrankene på to standardavvik, og feilskrankene for tilsatt salt er for små til å synes. Figur 4.1 og 4.3 er andregradsregresjonslinjer av formen $ax^2 + bx + c$, mens figur 4.2 er den deriverte av 4.1 og derfor en lineær regresjonslinje av formen $ax + b$. a, b og c er ulike for de ulike grafene. Grafen i figur 4.1 har koeffisienter og feilskranker $a = (3.1 \pm 0.4) \times 10^3$, $b = (34.8 \pm 0.3) \times 10^3$ og $c = 110 \pm 40$. Figur 4.2 er den deriverte av grafen i Figur 4.1 med $a = (6.3 \pm 0.7) \times 10^3$ og $b = (34.8 \pm 0.3) \times 10^3$. Grafen i figur 4.3 har koeffisienter $a = 57 \pm 3$, $b = 0 \pm 2$ og $c = 2.1 \pm 0.3$.



Figur 4.1: Total endring i blandingsentalpi som funksjon av total mengde tilsatt kaliumnitrat.



Figur 4.2: Partiell molar entalpi av kaliumnitrat som funksjon av total mengde tilsatt kaliumnitrat.



Figur 4.3: Partiell molar entalpi av vann som funksjon av total mengde tilsatt kaliumnitrat.

5 Diskusjon

Beregnet verdi for $\Delta H_{\text{KNO}_3}^0$ var på $34.8 \pm 0.3 \text{ kJ mol}^{-1}$. Litteraturverdien er på $34.89 \text{ kJ mol}^{-1}$, noe som ligger innenfor ett standardavvik fra beregnet verdi. ΔH_{vann}^0 ble beregnet til $2.1 \pm 0.7 \text{ J mol}^{-1}$. Litteraturverdien er på 0 J mol^{-1} , noe som ligger innenfor tre standardavvik fra beregnet verdi. Figur 4.1 viser at $\Delta_{\text{mix}}H$ øker tilnærmet lineært med mengde salt tilsatt. Dette stemmer godt overens med teorien, da ligning (2.2) viser at blandingsentalpien er lineært avhengig av mengde tilsatt salt. Usikkerheten i alle grafene øker med økende saltmengde. Dette skyldes at akkumulert saltmengde er en sum av flere porsjoner salt, som alle har usikkerhet knyttet til vekten av saltet.

Mulige årsaker til avvik fra litteraturverdier er at varmekapasiteten til løsningen ble målt før tilsats av salt, og dermed vil avvike noe fra den reelle varmekapasiteten til løsningen etter salt ble tilsatt. I tillegg ble det observert at noe av saltet ble igjen i trakten ved tilsats, og derfor er ikke mengden tilsatt salt nøyaktig lik mengde utveid salt. Dette medførte at saltmengde benyttet i utregningene var for høy, noe som vil gi for lav partiell molar entalpi. Dette kan forklare at beregnet verdi for ΔH_{salt}^0 var litt lavere enn litteraturverdien. I beregningen av $\Delta_{\text{mix}}H$ er ikke verdien for utveid salt benyttet, og beregnede verdier tilsvarer derfor den faktiske mengden salt som ble løst opp. Siden ΔH_{salt}^0 ble for lav kan dette være grunnen til at ΔH_{vann}^0 ble større enn litteraturverdien. Dette kan ses i ligning (2.12). Den viser at reduksjon av verdien til ΔH_{salt}^0 medfører høyere verdi for ΔH_{vann}^0 .

Varmekapasiteten ble antatt konstant over temperaturintervaller på ca. 0.6 K . Denne antagelsen viste seg å være god, da varmekapasiteten ble beregnet til tilnærmet samme verdi gjennom hele forsøket. For første tilsats av salt ble varmekapasiteten antatt å være lik varmekapasiteten til rent vann, grunnet lav konsentrasjon av saltet. Tabell B.2 viser at varmekapasiteten endret seg lite med temperaturen, og at varmekapasiteten til rent vann lå innenfor usikkerheten til de fleste beregnede verdiene. Antagelsen stemte derfor sannsynligvis godt. Det ble antatt at beholderen løsningen befant seg i var fullstendig isolert, og at det derfor ikke var noe utveksling av varme med omgivelsene. Temperaturen til løsningen var stabil etter temperaturendringen fra tilsats av salt eller varme var ferdig, og den var nær romtemperatur. Dette tyder på at antakelsen om ingen utveksling av varme med omgivelsene var god. Det ble også antatt at temperaturen var lik i hele løsningen ved avlesningstidspunktet. Dette er sannsynligvis en god antakelse, ettersom blandingen ble rørt i 15-30 sekunder mellom tilsats av salt og avlesning av temperatur. I tillegg ble det observert at temperaturen var stabil da den ble notert.

6 Konklusjon

Blandingsentalpien og de partielle molare entalpiene ble bestemt for en løsningen av KNO_3 og rent vann. Dette ble utført ved å løse små mengder KNO_3 i vann i et kalorimeter og måle temperaturendringene i løsningen. Fra dette ble entalpiendringene i løsningene beregnet. De partielle molare entalpiene for rent vann og KNO_3 ved uendelig fortynning ble beregnet til henholdsvis $34.8 \pm 0.3 \text{ kJ mol}^{-1}$ og $2.1 \pm 0.7 \text{ J mol}^{-1}$. Beregnet verdi for $\Delta H_{\text{KNO}_3}^0$ lå innefor ett standardavvik fra litteraturverdien på $34.89 \text{ kJ mol}^{-1}$, mens ΔH_{vann}^0 lå innenfor tre standardavvik fra litteraturverdien 0 J mol^{-1} . Avvik kan skyldes mekanisk tap av salt, samt antagelse om konstant varmekapasitet over små temperaturintervaller og perfekt isolasjon av kalorimeteret.

Referanser

- [1] W. Haynes. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, 91th edition, 2010. Enthalpy of Solution of Electrolytes.
- [2] S. Kjelstrup. *Prosjekter i KJ1042 Grunnleggende termodynamikk med laboratorium*. Tapir Akademiske forlag, 10th edition, 2016. s. 21-25.
- [3] Allan G. Blackman. *Aylward and Findlay's SI chemical data*. Wiley, 7th edition, 2014.

A Målinger

Tabell A.1 viser målte vekter av salt, samt vekten til plastbegrene før og etter forsøket ble utført. Tabell A.2 viser målte temperaturer i saltløsningen. For hver prøve indikerer T_0 , T_S og T_R henholdsvis starttemperatur, temperatur etter tilsats av salt og temperatur etter strømtilførsel.

Tabell A.1: Målte vekter

Prøvenummer	Vekt beger før[g]	Vekt salt[g]	Vekt beger etter[g]
1	0.6472 ± 10^{-4}	4.2833 ± 10^{-4}	0.6925 ± 10^{-4}
2	0.6175 ± 10^{-4}	3.9750 ± 10^{-4}	0.6873 ± 10^{-4}
3	0.6262 ± 10^{-4}	8.2673 ± 10^{-4}	0.6529 ± 10^{-4}
4	0.6564 ± 10^{-4}	8.1701 ± 10^{-4}	0.6720 ± 10^{-4}
5	0.6698 ± 10^{-4}	8.2869 ± 10^{-4}	0.6913 ± 10^{-4}
6	0.6438 ± 10^{-4}	7.9632 ± 10^{-4}	0.6555 ± 10^{-4}
7	0.6591 ± 10^{-4}	8.2238 ± 10^{-4}	0.6706 ± 10^{-4}
8	0.6664 ± 10^{-4}	8.1176 ± 10^{-4}	0.6737 ± 10^{-4}
9	0.6570 ± 10^{-4}	8.2551 ± 10^{-4}	0.6660 ± 10^{-4}

Tabell A.2: Målte temperaturer

Prøvenummer	$T_0[^\circ\text{C}]$	$T_S[^\circ\text{C}]$	$T_R[^\circ\text{C}]$
1	21.95 ± 0.01	21.58 ± 0.01	—
2	21.58 ± 0.01	21.27 ± 0.01	21.69 ± 0.01
3	21.69 ± 0.01	21.03 ± 0.01	21.46 ± 0.01
4	21.46 ± 0.01	20.82 ± 0.01	21.24 ± 0.01
5	21.24 ± 0.01	20.62 ± 0.01	21.04 ± 0.01
6	21.04 ± 0.01	20.44 ± 0.01	20.86 ± 0.01
7	20.86 ± 0.01	20.27 ± 0.01	20.68 ± 0.01
8	20.68 ± 0.01	20.10 ± 0.01	20.51 ± 0.01
9	20.51 ± 0.01	19.93 ± 0.01	20.35 ± 0.01

B Beregninger

Tabell B.1: Fysikalske data benyttet i forsøket

Størrelse	Verdi
Vanntetthet (ρ)	0.998 g mL^{-1}
Molar masse vann ($M_{\text{H}_2\text{O}}$)	18.05 g mol^{-1}
Molar masse kaliumnitrat (M_{KNO_3})	$101.10 \text{ g mol}^{-1}$
Romtemperatur	$23.0 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$
Trykk i omgivelsene	$75.9 \pm 0.1 \text{ cmHg}$
Vanns varmekapasitet (C_p)	4.1814 J g^{-1}
Spennning (U)	12.000 V

B.1 Stoffmengder

Antall mol H_2O tilsatt beregnes fra

$$n = \frac{\rho V}{M_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (\text{B.1})$$

hvor n er stoffmengde, ρ er tettheten til vann, V er utmålt volum og $M_{\text{H}_2\text{O}}$ er molar masse til vann. Innsatt for $V = 1000 \text{ mL}$, og med ρ og $M_{\text{H}_2\text{O}}$ som i tabell B.1 blir tilsatt mengde H_2O lik 55.29 mol . Antall mol akkumulert KNO_3 beregnes fra

$$n_{akk,k} = \frac{1}{M_{\text{KNO}_3}} \sum_{i=1}^k m_{\text{KNO}_3,i}, \quad (\text{B.2})$$

hvor $n_{akk,k}$ er akkumulert mengde KNO_3 etter k tilsatser, $m_{\text{KNO}_3,i}$ er massen av tilsatt kaliumnitrat i tilsats i og M_{KNO_3} er molar masse til kaliumnitrat som gitt i tabell B.1. Innsatt for massene gitt i tabell A.1 ga dette stoffmengdene gitt i tabell B.3.

B.2 Beregning av ΔT_S og ΔT_R

Endring i temperatur ved tilsats av KNO_3 (ΔT_S) er beregnet ved

$$\Delta T_S = T_S - T_0, \quad (\text{B.3})$$

hvor T_S er stabil temperatur målt 20-30 sekunder etter tilsats av salt og T_0 er temperatur rett før tilsats av salt. Endring i temperatur ved tilførsel av varme (ΔT_R) er beregnet ved

$$\Delta T_R = T_R - T_S, \quad (\text{B.4})$$

hvor T_R er stabil temperatur målt 20-30 sekunder etter tilførsel av varme og T_S er temperatur rett før tilførsel av varme. Verdier brukt i beregningen er vist i tabell A.2, og resultatene er vist i tabell B.2.

B.3 Varmekapasitet

Innsetting av ligning (2.8) i ligning (2.7) gir

$$C_p = \frac{U^2 t}{R \Delta T_R}. \quad (\text{B.5})$$

Ved innsetting av U , t og R som vist i tabell B.1 og ΔT_R som vist i tabell B.2 ble varmekapasitetene vist i tabell B.2 beregnet.

B.4 $\Delta_{\text{mix}}H$

For å finne $\Delta_{\text{mix}}H$ ble formel (2.10) brukt. Entalpiendringene fra tilsats av salt i vann ble brukt til å lage en andregradsregresjonslinje. Denne er vist i figur 4.1. Beregnede koeffisienter fra regresjonen er vist i tabell B.4. Beregnede verdier for $\Delta_{\text{mix}}H$ er vist i tabell B.3.

B.5 ΔH_{salt} og ΔH_{salt}^0

Regresjonskurven for $\Delta_{\text{mix}}H$ ble derivert, og den deriverte er da lik ΔH_{salt} ;

$$\Delta H_{\text{salt}} = \frac{d(a(n_{\text{salt}}^{\text{akk}})^2 + bn_{\text{salt}}^{\text{akk}} + c)}{dn_{\text{salt}}^{\text{akk}}} = 2an_{\text{salt}}^{\text{akk}} + b \quad (\text{B.6})$$

med a , b og c som vist i tabell B.4. Beregnede verdier for ΔH_{salt} er vist i tabell B.3. ΔH_{salt}^0 ble funnet ved ekstrapolering av grafen i ligning B.6 til 0 mol tilsatt salt, og vil derfor være lik konstanten b i ligningen. Den har derfor en verdi på $(34.8 \pm 0.3) \text{ kJ mol}^{-1}$, beregning av usikkerheten er vist i vedlegg C.5.

B.6 ΔH_{vann} og ΔH_{vann}^0

ΔH_{vann} er beregnet fra ligning (2.12). Innsetning av verdiene for ΔH_{mix} og ΔH_{salt} vist i tabell B.3, samt verdiene for C_p vist i tabell B.2 ga verdiene for ΔH_{vann} vist i tabell B.3. Andregradsregresjon ble så utført, og koeffisientene er vist i tabell B.5. Beregnet verdi for ΔH_{vann}^0 kommer fra innsetting av ΔH_{salt}^0 i ligning (2.12), og fikk en verdi på $2.1 \pm 0.7 \text{ J mol}^{-1}$.

B.7 Tabeller med beregnede verdier

Tabell B.2: Beregnede temperaturforskjeller, varmekapasiteter og blandingsentalpier. Tilsats nr. samsvarer med prøvenummer i tabell A.1 og A.2. *For første tilsats ble litteraturverdi for varmekapasiteten til rent vann benyttet.^[3]

Tilsats nr.	ΔT_S [K]	ΔT_R [K]	C_p [kJ K ⁻¹ kg ⁻¹]	$\Delta_{\text{mix}}H$ [kJ]
1	-0.37 ± 0.014	—	4.18*	1.59 ± 0.09
2	-0.31 ± 0.014	0.42 ± 0.014	4.29 ± 0.15	1.33 ± 0.09
3	-0.66 ± 0.014	0.43 ± 0.014	4.19 ± 0.14	2.77 ± 0.08
4	-0.64 ± 0.014	0.42 ± 0.014	4.29 ± 0.15	2.75 ± 0.09
5	-0.62 ± 0.014	0.42 ± 0.014	4.29 ± 0.15	2.66 ± 0.09
6	-0.60 ± 0.014	0.42 ± 0.014	4.29 ± 0.15	2.58 ± 0.09
7	-0.59 ± 0.014	0.41 ± 0.014	4.4 ± 0.15	2.60 ± 0.09
8	-0.58 ± 0.014	0.41 ± 0.014	4.4 ± 0.15	2.55 ± 0.09
9	-0.58 ± 0.014	0.42 ± 0.014	4.29 ± 0.15	2.49 ± 0.09

Tabell B.3: Akkumulert blandingsentalpi og partielle entalpier av kaliumnitrat og vann som funksjon av total mengde tilsatt kaliumnitrat.

n_{akk} [mmol]	ΔH_{salt} [kJ mol ⁻¹]	ΔH_{vann} [J mol ⁻¹]	$\Delta_{\text{mix}}H_{\text{akk}}$ [kJ]
42.366 ± 0.001	34.5 ± 0.2	2.4 ± 1.6	1.59 ± 0.09
81.682 ± 0.001	34.3 ± 0.2	2.3 ± 2.2	2.93 ± 0.12
163.453 ± 0.002	33.7 ± 0.2	3.2 ± 2.8	5.69 ± 0.15
244.262 ± 0.002	33.2 ± 0.2	5.9 ± 3.3	8.44 ± 0.17
326.227 ± 0.002	32.7 ± 0.3	7.8 ± 3.8	11.10 ± 0.19
404.99 ± 0.002	32.2 ± 0.3	11.4 ± 4.3	13.68 ± 0.21
486.331 ± 0.003	31.7 ± 0.3	15.4 ± 5.0	16.28 ± 0.23
566.621 ± 0.003	31.2 ± 0.4	20.6 ± 5.8	18.83 ± 0.24
648.277 ± 0.003	30.7 ± 0.4	25.6 ± 6.8	21.32 ± 0.26

Tabell B.4: Koeffisienter returnert av andregradsregresjonen vist i figur 4.1

Koeffisient	Verdi	Varians
Andregradsledd(a)	$3.1 \cdot 10^3$	$0.04 \cdot 10^3$
Førstegradsledd(b)	$34.8 \cdot 10^3$	$0.0225 \cdot 10^3$
Konstantledd(c)	110	400

Tabell B.5: Koeffisienter returnert av andregradsregresjonen vist i figur 4.3

Koeffisient	Verdi	Varians
Andregradsledd(a)	57	2.25
Førstegradsledd(b)	0	1
Konstantledd(c)	2.1	0.0225

C Usikkerhetsanalyse

Gauss' feilforplantningslov er gitt ved

$$(\delta f)^2 = \sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2 \quad (\text{C.1})$$

hvor f er en funksjon av variablene x_i , δf er usikkerhet i f og δx_i er usikkerhet i variabelen x_i .

Tabell C.1: Usikkerheten i de målte størrelsene i forsøket

Observabel	Usikkerhet
Volum	0.4 mL
Temperatur	0.01 K
Masse	0.0001 g
Spenning	0.01 V
Motstand	0.01 Ω

C.1 Temperaturendringer

Temperaturendringer er generelt beregnet ved

$$\Delta T = T_1 - T_0, \quad (\text{C.2})$$

hvor T_0 og T_1 er temperatur hhv. før og etter endringen. Gauss' feilforplantningslov med δT som gitt i tabell C.1 gir dermed

$$\begin{aligned} \delta \Delta T &= \sqrt{(\delta T_1)^2 + (-\delta T_0)^2} \\ &= \sqrt{2} \delta T \\ &= 0.014 \text{ K}. \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

C.2 Varmekapasitet

Usikkerheten i varmekapasitet er regnet ut fra Gauss' feilforplantningslov, med C_p beregnet fra ligning (B.5),

$$\begin{aligned} \delta C_p &= \sqrt{\left(\frac{\partial C_p}{\partial \Delta T} \delta \Delta T \right)^2 + \left(\frac{\partial C_p}{\partial U} \delta U \right)^2 + \left(\frac{\partial C_p}{\partial R} \delta R \right)^2} \\ &= \sqrt{\left(-\frac{U^2 t}{R(\Delta T)^2} \delta \Delta T \right)^2 + \left(\frac{2Ut}{R\Delta T} \delta U \right)^2 + \left(-\frac{U^2 t}{R^2 \Delta T} \delta R \right)^2}. \end{aligned}$$

Innsatt for usikkerhet i motstand og spenning som vist i tabell C.1, og usikkerhet i temperaturendringer som beregnet i ligning (C.3) gir dette usikkerhetene vist i tabell B.2.

C.3 Stoffmengder

Akkumulert stoffmengde salt etter k tilsetninger ble beregnet fra ligning (B.2). Etter k tilsattser gir Gauss' feilforplantningslov

$$\begin{aligned}\delta n_{akk,k} &= \frac{1}{M_{\text{KNO}_3}} \sqrt{\sum_{i=1}^k (\delta m_i)^2} \\ &= \frac{\sqrt{k}}{M_{\text{KNO}_3}} \delta m.\end{aligned}\tag{C.4}$$

Innsatt for molar masse gitt i tabell B.1 og usikkerhet i masse gitt i tabell C.1 blir de beregnede usikkerhetene i akkumulert stoffmengde salt som vist i tabell B.3. Stoffmengde tilsatt vann er beregnet fra ligning (B.1). Gauss' feilforplantningslov gir da

$$\delta n_{\text{H}_2\text{O}} = \sqrt{\left(\frac{\rho}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \delta V\right)^2}.\tag{C.5}$$

Innsatt for ρ og $M_{\text{H}_2\text{O}}$ som vist i tabell B.1 og δV som vist i tabell C.1 ble usikkerhet i stoffmengde tilsatt vann beregnet til $\delta n_{\text{H}_2\text{O}} = 0.002$ mol.

C.4 Partiell molar entalpi

Partiell molar entalpi av vann ble beregnet fra ligning (2.12). Gauss' feilforplantningslov gir da

$$\begin{aligned}\delta \Delta H_{\text{vann}} &= \left[\left(\frac{-\Delta H_{\text{salt}}}{n_{\text{vann}}} \delta n_{\text{salt}}^{akk} \right)^2 \right. \\ &\quad + \left(\frac{-n_{\text{salt}}^{akk}}{n_{\text{vann}}^2} \left(\frac{\Delta_{\text{mix}} H}{n_{\text{salt}}^{akk}} - \Delta H_{\text{salt}} \right) \delta n_{\text{vann}} \right)^2 \\ &\quad \left. + \left(\frac{\delta \Delta_{\text{mix}} H}{n_{\text{vann}}} \right)^2 + \left(\frac{-n_{\text{salt}}^{akk}}{n_{\text{vann}}} \delta \Delta H_{\text{salt}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.\end{aligned}\tag{C.6}$$

Innsatt for verdiene for ΔH_{salt} , $\Delta_{\text{mix}} H$ og n_{salt}^{akk} med tilhørende usikkerheter som vist i tabell B.3, samt n_{vann} som beregnet i B.1 med usikkerhet beregnet i C.3 ga dette usikkerhetene i ΔH_{vann} vist i tabell B.3.

Partiell molar entalpi for kaliumnitrat ble beregnet fra ligning (B.6). Gauss' feilforplantningslov gir dermed

$$\delta\Delta H_{\text{salt}} = \sqrt{(2n_{\text{salt}}^{akk}\delta a)^2 + (2a\delta n_{\text{salt}}^{akk})^2 + (\delta b)^2}. \quad (\text{C.7})$$

Innsatt for a og b som vist i tabell B.4, δa og δb lik kvadratroten av de tilhørende variansene og n_{salt}^{akk} med tilhørende usikkerhet som vist i tabell B.3 ga dette usikkerhetene i ΔH_{salt} som vist i tabell B.3. ΔH_{salt}^0 ble beregnet som beskrevet i B.5. Usikkerhet i ΔH_{salt}^0 er dermed gitt som kvadratroten av variansen til førstegradsleddet i tabell B.4.

C.5 Blandingsentalpi

Blandingsentalpien $\Delta_{\text{mix}}H$ ble beregnet fra ligning (2.10). Gauss' feilforplantningslov gir dermed

$$\begin{aligned} \delta\Delta_{\text{mix}}H^{(n)} &= \sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial\Delta_{\text{mix}}H}{\partial\Delta H^{(i)}} \delta\Delta H^{(i)} \right)^2} \\ &= \sqrt{n}\delta\Delta H^{(i)} \end{aligned} \quad (\text{C.8})$$

Usikkerheten i $\Delta H^{(i)}$ beregnes med Gauss' feilforplantningslov, og er gitt ved

$$\delta\Delta H^{(i)} = \sqrt{\left(C_p^{(i)}\delta\Delta T^{(i)}\right)^2 + \left(\Delta T^{(i)}\delta C_p^{(i)}\right)^2}. \quad (\text{C.9})$$

Innsetting av varmekapasiteter og tilhørende usikkerheter vist i tabell B.2, temperaturendringer ΔT_S vist i tabell B.3, og usikkerhet i temperaturendringer beregnet i ligning (C.3) ga usikkerhetene i $\Delta_{\text{mix}}H$ vist i tabell B.3.

D Symbolliste

Symbol	Dimensjon	Betegnelse
n	mol	Stoffmengde
$n_{\text{KNO}_3}^{\text{akk}}$	mol	Akkumulert stoffmengde KNO_3
H	Jmol^{-1}	Molar entalpi
$\Delta_{\text{mix}}H$	Jmol^{-1}	Molar blandingsentalpi
ΔH_{salt}	Jmol^{-1}	Partiell molar entalpi for KNO_3
ΔH_{vann}	Jmol^{-1}	Partiell molar entalpi for rent vann
ΔH_{salt}^0	Jmol^{-1}	Partiell molar entalpi for KNO_3 ved uendelig fortynning
ΔH_{vann}^0	Jmol^{-1}	Partiell molar entalpi for rent vann ved uendelig fortynning
p	Pa	Trykk
R	$\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$	Den universelle gasskonstanten lik 8.314472
T	K	Temperatur
ΔT_R	K	Temperaturendring ved varmetilførsel
ΔT_S	K	Temperaturendring ved salttilførsel
U	V	Spenning
R	Ω	Motstand
q	J	Varme
C_p	$\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$	Varmekapasitet ved konstant trykk