

# Partiell molar entalpi

Eva Tula Larsen Aunet, Emma Birkeland,  
Alexander Barkatsa Sæbø og Erlend Sørli

Gruppe 4a-4

April 2021

## Sammendrag

I dette eksperimentet ble blandingsentalpien og den partielle molare entalpien til kaliumnitrat og vann bestemt. Dette ble gjort ved å tilsette små mengder  $\text{KNO}_3$  i vann i et kalorimeter og måle temperaturendringene i løsningen. Ved å utføre en regresjonsanalyse på resultatene ble de partielle molare entalpiene til kaliumnitrat og vann ved uendelig fortynning, bestemt til å være henholdsvis  $35,51 \pm 0,12 \text{ kJ mol}^{-1}$  og  $1,3 \pm 0,3 \text{ J mol}^{-1}$ . Begge verdiene ligger mer enn to standardavvik unna litteraturverdiene. Avvik kan skyldes forskjell fra antakelser gjort under beregningene, men den største feilkilden er trolig at temperaturmålingene ble gjort før temperaturen hadde stabilisert seg.

# Innhold

|          |                                      |           |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduksjon</b>                  | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>Teori</b>                         | <b>4</b>  |
| <b>3</b> | <b>Eksperimentelt</b>                | <b>5</b>  |
| 3.1      | Apparatur . . . . .                  | 5         |
| 3.2      | Utførelse . . . . .                  | 5         |
| <b>4</b> | <b>Resultater</b>                    | <b>6</b>  |
| <b>5</b> | <b>Diskusjon</b>                     | <b>8</b>  |
| <b>6</b> | <b>Konklusjon</b>                    | <b>8</b>  |
| <b>A</b> | <b>Data for forsøket</b>             | <b>10</b> |
| <b>B</b> | <b>Beregnete verdier</b>             | <b>11</b> |
| <b>C</b> | <b>Beregninger</b>                   | <b>12</b> |
| C.1      | Stoffmengder . . . . .               | 12        |
| C.2      | Temperaturendringer . . . . .        | 12        |
| C.3      | Varmekapasitet . . . . .             | 12        |
| C.4      | Blandingsentalpien . . . . .         | 12        |
| C.5      | Partielle molare entalpier . . . . . | 13        |
| <b>D</b> | <b>Usikkerhetsberegninger</b>        | <b>14</b> |
| D.1      | Temperaturendringer . . . . .        | 14        |
| D.2      | Overført varme . . . . .             | 14        |
| D.3      | Varmekapasitet . . . . .             | 14        |
| D.4      | Stoffmengder . . . . .               | 14        |
| D.5      | Partiell molar entalpi . . . . .     | 15        |
| D.6      | Blandingsentalpi . . . . .           | 15        |

## 1 Introduksjon

Varmetoning beskriver endringen i temperatur som oppstår når et stoff løses i vann ved kjemiske reaksjoner<sup>[1]</sup>. Dette kommer av at intermolekylære bindinger blir brutt og dannet, og det er energien lagret i disse bindingene som skaper temperaturendringene. Det er derfor viktig å ha kjennskap til varmetoning i industrien. Dette gjelder spesielt prosesser hvor stoff blandes. Dette er for å vite hvordan temperaturen i ulike prosesser kan påvirkes ved tilsetning av stoff.

Varmetoning måles med et kalorimeter, og brukes til å bestemme blandingsentalpien og de partielle molare entalpiene til komponentene i en blanding. Blandingsentalpien defineres som entalpiendringen ved blanding av ulike stoff, mens de partielle molare entalpiene defineres som temperaturendring for hvert mol komponent tilsatt den andre komponenten.

I dette eksperimentet ble varmetoningen av kaliumnitrat løst i rent vann betraktet. Videre bestemmes blandingsentalpien og de partielle molare entalpiene for  $\text{KNO}_3$  og vann eksperimentelt.

## 2 Teori

Entalpi  $H$  er en ekstensiv størrelse, og avhenger derfor av mengden komponenter til stede. I et system med to komponenter vil blandingsentalpien  $H_{\text{mix}}$  være gitt ved

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

hvor  $n_1$  og  $n_2$  er stoffmengde, og  $H_1$  og  $H_2$  partiell molar entalpi, til komponent 1 og 2. Det antas her at blandingen er ideell, trykk og temperatur konstant og systemet lukket og isolert. Standardtilstanden for entalpi,  $H^*$ , er definert som entalpien til ren, stabil komponent ved  $T = 298 \text{ K}$  og  $p = 1 \text{ bar}$ . Entalpiforskjellen  $\Delta_{\text{mix}}H$  mellom en vilkårlig tilstand  $H$  og standardtilstanden  $H^*$  uttrykkes da ved

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

Fra likning (2.2) kan definisjonslikningen for partiell molar entalpi  $\Delta H$  av komponent  $i$  utledes:

$$\Delta H_i = \left( \frac{\partial \Delta_{\text{mix}}H}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_j}. \quad (2.3)$$

Her er  $\partial \Delta_{\text{mix}}H$  partiell entalpiforskjell og  $\partial n_i$  endring i stoffmengden til komponent  $i$ . Temperatur, trykk og stoffmengde til komponent  $j$  holdes konstant under endringen. Tilsats av komponent 2 vil gjøre at blandingsentalpien endres. Endringen kan beskrives med følgende formel etter tilsats nummer  $k$ :

$$\Delta H^{(k)} = -C_p^{(k)} \Delta T_S^{(k)}, \quad (2.4)$$

hvor  $C_p$  er varmekapasiteten til løsningen ved konstant trykk og  $\Delta T_S$  er temperaturendring ved tilsats av komponent 2. Varmekapasiteten kan bestemmes ved å tilsette en kjent mengde varme  $q$  fra en ekstern kilde, og bruke følgende sammenheng:

$$C_p^{(k)} = \frac{q^{(k)}}{\Delta T_R^{(k)}}, \quad (2.5)$$

der  $\Delta T_R$  er temperaturendringen fra varmetilførselen. Dersom varmen tilføres fra en spenningskilde, kan den beregnes fra spenningen  $U$ , tiden  $t$  og motstanden  $R$ :

$$q = \frac{U^2 t}{R}. \quad (2.6)$$

Ved å summere entalpiene i hver enkelt tilsats, kan blandingsentalpien bestemmes. Mengden akkumulert stoffmengde  $n_2$  etter  $k$  tilsetninger av komponent 2 er da gitt ved

$$n_2^{\text{akk}, (k)} = \sum_{i=1}^k n_2^{(i)}, \quad (2.7)$$

hvor  $n_2^{(i)}$  er stoffmengde av komponent 2 tilsatt i måling  $k$ . Blandingsentalpien  $\Delta_{\text{mix}} H^{(k)}$  etter  $k$  tilsetninger vil være

$$\Delta_{\text{mix}} H^{(k)} = \sum_{i=1}^k \Delta H^{(i)}. \quad (2.8)$$

Den partielle molare entalpien til komponent 2 kan bestemmes med likning (2.3). Når denne er kjent kan den partielle molare entalpien til komponent 1 finnes ved å omforme likning (2.2) til

$$\Delta H_1 = \frac{n_2^{\text{akk}}}{n_1} \left( \frac{\Delta_{\text{mix}} H}{n_2^{\text{akk}}} - \Delta H_2 \right). \quad (2.9)$$

Alle likninger er hentet fra labheftet.<sup>[2]</sup>

## 3 Eksperimentelt

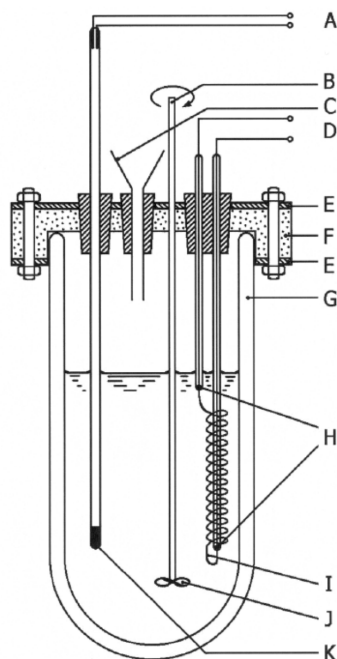
### 3.1 Apparat

I dette forsøket ble det brukt et kalorimeter som vist i Figur 3.1, for å måle varmen i forsøket. Utstyret består av et Dewar-kar (G), som er en isolerende beholder. Denne har et isoporlokk (F) med pleksiglass (E) rundt. Saltet ble tilsatt gjennom ett hull i lokket (C) som ellers var tettet med en propp. Systemet bestod også av en rører (J) koblet til en motor (B), en varmespiral (H/I) koblet til en spenningskilde (D) og en temperatursensor (K) koblet til et termometer (A).

### 3.2 Utførelse

Det ble veid ut 9 porsjoner  $\text{KNO}_3$  med analysevekt. To av porsjonene var på ca. 4 g  $\text{KNO}_3$ , mens de resterende var på ca. 8 g  $\text{KNO}_3$ . Kalorimeteret ble fylt med 1 L destillert vann, apparaturen ble satt opp som vist i Figur 3.1. Løsningen ble satt under konstant omrøring.

Temperaturen i beholderen ble målt før hver tilsats av  $\text{KNO}_3$ . Deretter ble det tilsatt en porsjon  $\text{KNO}_3$ , og temperaturen avlest når den var stabil. Spenningskilden ble slått på i 40 s, og temperaturen avlest igjen når den var stabil. Dette ble gjentatt for alle de ni prøvene, hvor de på 4 g ble tilsatt først. Til slutt ble trykket og temperaturen i rommet målt.



**Figur 3.1:** Skisse av kalorimeter brukt til måling av varmetoning. Bokstavene forklares i avsnitt 3.1.<sup>[2]</sup>

## 4 Resultater

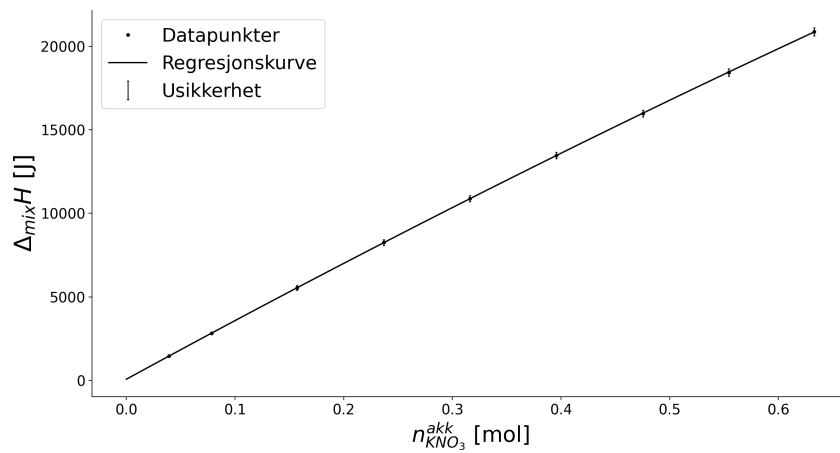
I Figur 4.1 er blandingsentalpien plottet mot total mengde tilsatt  $\text{KNO}_3$ . I Figur 4.2 og 4.3 er den partielle molare entalpien for henholdsvis  $\text{KNO}_3$  og vann i blandingen plottet mot den totale mengden tilsatt  $\text{KNO}_3$ . Usikkerheten i tilsatt mengde  $\text{KNO}_3$  er for liten til å synes. Det ble utført andregradsregresjoner av datapunktene i Figur 4.1 og Figur 4.3. Regresjonsuttrykkene for blandingsentalpien og partiell molar entalpi til vann og  $\text{KNO}_3$  ble:

$$\Delta_{\text{mix}}H = (-4223 \pm 170)(n_{\text{KNO}_3}^{\text{akk}})^2 + (35506 \pm 115)n_{\text{KNO}_3}^{\text{akk}} + (73 \pm 16)$$

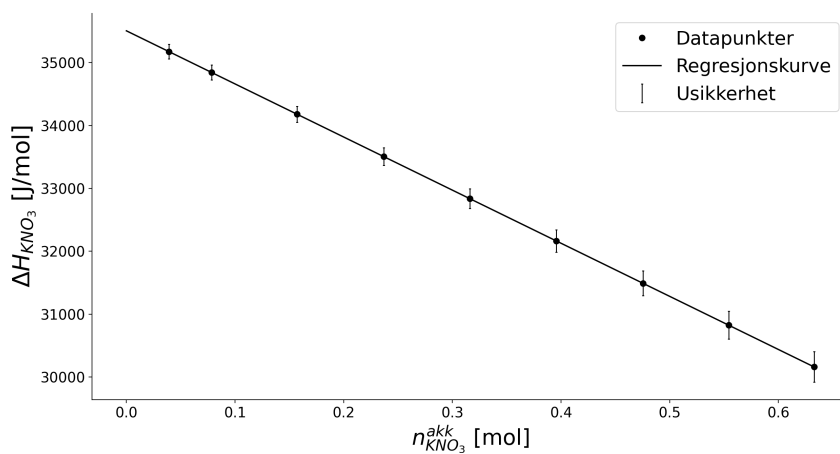
$$\Delta H_{\text{H}_2\text{O}} = (76,1 \pm 3,1)(n_{\text{KNO}_3}^{\text{akk}})^2 + (-4,1 \pm 2,1)n_{\text{KNO}_3}^{\text{akk}} + (1,3 \pm 0,3)$$

$$\Delta H_{\text{KNO}_3} = (-8446 \pm 340)n_{\text{KNO}_3}^{\text{akk}} + (35506 \pm 115)$$

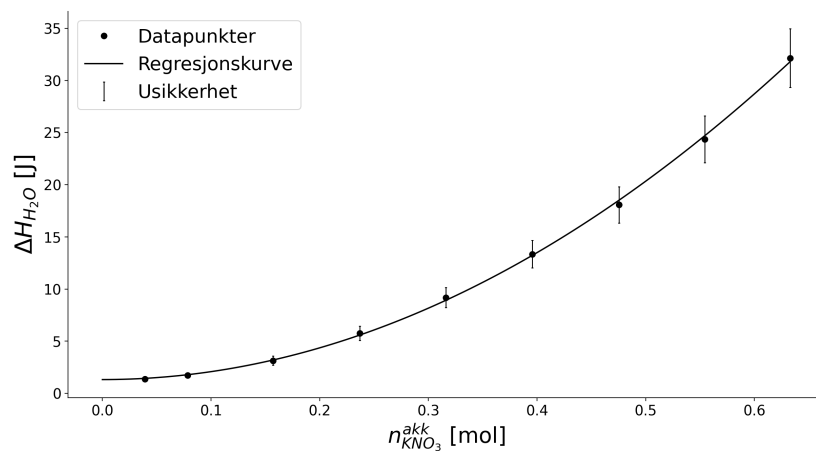
Regresjonskurven til  $\Delta H_{\text{KNO}_3}$  er den deriverte til blandingsentalpien,  $\Delta_{\text{mix}}H$ . Verdier beregnet underveis er gitt i Vedlegg B med én usikkerhet. For å finne de partielle molare entalpiene til  $\text{KNO}_3$  og vann, ved uendelig fortynning, ble regresjonskurvene til  $\Delta H_{\text{KNO}_3}$  og  $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}$  ekstrapolert til  $n_{\text{KNO}_3}^{\text{akk}} = 0$ . Den partielle molare entalpien til  $\text{KNO}_3$  ved uendelig fortynning,  $\Delta H_{\text{KNO}_3}^0$ , ble bestemt til  $35,51 \pm 0,12 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Tilsvarende ble den partielle molare entalpien til vann ved uendelig fortynning bestemt til å være  $1,3 \pm 0,3 \text{ J mol}^{-1}$ .



**Figur 4.1:** Plott av total endring i blandingsentalpi mot total mengde tilsatt kaliumnitrat.



**Figur 4.2:** Plott av den partielle molare entalpien til kaliumnitrat mot total mengde tilsatt kaliumnitrat.



**Figur 4.3:** Plott av den partielle molare entalpien til vann mot total mengde tilsatt kaliumnitrat.

## 5 Diskusjon

Partiell molar entalpi til  $\text{KNO}_3$  ble bestemt til  $35,51 \pm 0,12 \text{ kJ}$ . Litteraturverdien er  $34,89 \text{ kJ}^{[3]}$ , hvilket faller utenfor to standardavvik. Partiell molar entalpi til vann ble bestemt til  $1,3 \pm 0,3 \text{ J mol}^{-1}$ . Litteraturverdien er på  $0 \text{ J mol}^{-1}^{[3]}$ . Figur 4.1 viser at blandingsentalpien øker tilnærmet lineært med akkumulert saltmengde, som stemmer overens med likning (2.2) fra teorien. Alle grafene har usikkerhet som øker med økende mengde salt. Dette har sin forklaring i at akkumulert saltmengde er en sum av mange tilsatser, som alle har en usikkerhet tilknyttet vekten av saltet.

I Figur 4.1 vises det at  $\Delta_{\text{mix}}H$  har en tilnærmet lineær økning med antall mol tilsatt kaliumnitrat. Dette stemmer overens med teorien, ettersom likning (2.2) viser at  $\Delta_{\text{mix}}H$  øker lineært for økende mengde tilsatt kaliumnitrat.

I Figur 4.2 vises det at den partielle molare entalpien til kaliumnitrat avtar med økende tilsats av kaliumnitrat. Dette skyldes at det er lettere å bryte hydrogenbindingene mellom vannmolekylene dersom det allerede er ioner i løsningen. Dermed vil entalpiendringen per mengde tilsatt kaliumnitrat avta med økende total mengde kaliumnitrat i løsningen.

Figur 4.3 viser at den partielle molare entalpien til vann øker med økende tilsats av kaliumnitrat. Økningen er bare noen få joule, og stammer antakeligvis fra usikkerheten i regresjonen.

Avvikene fra litteraturverdiene kan stamme fra at temperaturmålingene ble gjort for tidlig slik at temperaturen ikke hadde rukket å stabilisere seg. Dette kan ha ført til større verdier for varmekapasiteten, som igjen vil gi større verdier for partiell molar entalpi til  $\text{KNO}_3$ . Dette er trolig den største feilkilden i forsøket.

Det ble gjort flere antakelser i dette forsøket, som kan ha vært rot til små feilkilder. Det ble antatt ideell blanding, som innebærer en homogen fordeling av saltet i vannet. En rører bidro til en jevnere konsentrasjonsfordeling, men blandingen vil uansett ikke oppføre seg helt ideelt. Den partielle molare entalpien til vann ble bestemt til  $1,3 \pm 0,3 \text{ J mol}^{-1}$ . For en ideell blanding ville den vært  $0 \text{ J mol}^{-1}$ . Dette er ikke et stort avvik. Antakelsen om en ideell blanding er derfor rimelig. Hvis det derimot hadde blitt tilsatt en veldig stor mengde salt, ville løsningen blitt overmettet, og blandingen ikke lenger ideell. Da ville antakelsen ikke lenger gi nøyaktige resultater.

Det ble antatt standardbetingelser for trykk og temperatur, altså temperatur lik  $25^\circ\text{C}$  og trykk lik  $75,1 \text{ cmHg}$ . Romtemperaturen ble målt til  $21,80^\circ\text{C}$  og trykket til  $76,0 \text{ cmHg}$ . At romtemperaturen er lavere enn  $25^\circ\text{C}$  kan gjøre at den beregnede verdien for partiell molar entalpi til kaliumnitrat blir for lav, men siden den partielle molare entalpien til kaliumnitrat ble bestemt til å være høyere enn litteraturverdien, har ikke denne antakelsen påvirket resultatene i negativ retning.

Ved bruk av kalorimeter ble det antatt at systemet er fullstendig isolert, noe som impliserer at det ikke skjer noen varmeutveksling med omgivelsene. Temperaturen i løsningen stabiliserte seg etter tilsats av salt eller varme, og den var nær romtemperatur, hvilket tyder på at antakelsen om isolert system var god. Det ble også antatt at varmekapasiteten var konstant før og etter tilsats av salt. Ettersom temperaturintervallet mellom hver tilsats bare var på  $0,6 \text{ K}$ , er dette en rimelig antakelse.

## 6 Konklusjon

Blandingsentalpien og partielle molare entalpier til kaliumnitrat og vann ble bestemt med kalorimetri. Den partielle molare entalpien til  $\text{KNO}_3$  ble bestemt til  $35,51 \pm 0,12 \text{ kJ}$ , hvilket er noe høyere enn litteraturverdien. Den partielle molare entalpien til vann ble bestemt til  $1,3 \pm 0,3 \text{ J mol}^{-1}$ , mens litteraturverdien er på  $0 \text{ J mol}^{-1}$ . Avvik kan skyldes forskjell fra antakelser gjort under beregningene, men den største feilkilden er trolig at temperaturmålingene ble gjort før temperaturen hadde stabilisert seg.

## Referanser

- [1] B. Pedersen, “Varmetoning.” <https://snl.no/varmetoning>. (Hentet 26.04.2021).
- [2] K. R. Kristiansen, A. Broggi, and S. Kjelstrup, “Prosjekter i TKJ4162-Fysikalsk kjemi: Kjemisk termodynamikk.” [https://ntnu.blackboard.com/bbcswebdav/pid-1245242-dt-content-rid-33516461\\_1/xid-33516461\\_1.pdf](https://ntnu.blackboard.com/bbcswebdav/pid-1245242-dt-content-rid-33516461_1/xid-33516461_1.pdf). (Hentet 16.02.2021).
- [3] H. WM., *CRC: Handbook of Chemistry and Physics. 11th edt.* Taylor & Francis, 2016.
- [4] Wiley, *Aylward, G.H and Finlay, SI Chemical Data 7th edt.* Australia, 2014.

## A Data for forsøket

Fysikalsk data brukt til beregningene i dette eksperimentet vises i Tabell A.1.

**Tabell A.1:** Tabell over fysikalske data brukt i dette eksperimentet<sup>[4] [3]</sup>.

| Størrelse                                                           | Verdi   | Enhet                |
|---------------------------------------------------------------------|---------|----------------------|
| Molar masse $\text{KNO}_3$ , $M_{\text{KNO}_3}$                     | 101,103 | $\text{g mol}^{-1}$  |
| Molar masse vann, $M_{\text{H}_2\text{O}}$                          | 18,016  | $\text{g mol}^{-1}$  |
| Partiell molar entalpi vann, $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^0$      | 0,00    | $\text{kJ mol}^{-1}$ |
| Partiell molar entalpi $\text{KNO}_3$ , $\Delta H_{\text{KNO}_3}^0$ | 34,89   | $\text{kJ mol}^{-1}$ |
| Tetthet vann, $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$                           | 1,00    | $\text{g mL}^{-1}$   |

Tabell A.2 gir en oversikt over målte verdier brukt i dette eksperimentet. Disse verdiene holdes konstante gjennom hele forsøket.

**Tabell A.2:** Tabell over målte verdier brukt i dette eksperimentet.

| Størrelse                            | Verdi               | Enhet              |
|--------------------------------------|---------------------|--------------------|
| Motstand, $R$                        | $4,86 \pm 0.01$     | $\Omega$           |
| Romtemperatur, $T_{\text{rom}}$      | $21,080 \pm 0,0005$ | $^{\circ}\text{C}$ |
| Spennings, $U$                       | $11,95 \pm 0.01$    | V                  |
| Trykk, $p$                           | $76,00 \pm 0.05$    | cmHg               |
| Volum vann, $V_{\text{H}_2\text{O}}$ | $1000,0 \pm 0,4$    | mL                 |

I Tabell A.3 vises de målte temperaturene for løsningen før tilsats av  $\text{KNO}_3$  ( $T_1$ ), stabil temperatur etter tilsats av  $\text{KNO}_3$  ( $T_2$ ) og stabil temperatur etter oppvarming ( $T_3$ ).

**Tabell A.3:** Tabell over målte temperaturer i forsøket før og etter tilførsel av  $\text{KNO}_3$  og oppvarming.

| Tilsats, $k$ | $m_{\text{KNO}_3}$ [g] | $T_1$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] | $T_2$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] | $T_3$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |
|--------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1            | $3,9547 \pm 0,00005$   | $21,080 \pm 0,0005$          | $20,745 \pm 0,0005$          | $21,016 \pm 0,0005$          |
| 2            | $3,9641 \pm 0,00005$   | $21,016 \pm 0,0005$          | $20,696 \pm 0,0005$          | $20,970 \pm 0,0005$          |
| 3            | $7,9625 \pm 0,00005$   | $20,970 \pm 0,0005$          | $20,348 \pm 0,0005$          | $20,617 \pm 0,0005$          |
| 4            | $8,0714 \pm 0,00005$   | $20,617 \pm 0,0005$          | $20,005 \pm 0,0005$          | $20,270 \pm 0,0005$          |
| 5            | $8,0035 \pm 0,00005$   | $20,275 \pm 0,0005$          | $19,666 \pm 0,0005$          | $19,938 \pm 0,0005$          |
| 6            | $8,0514 \pm 0,00005$   | $19,938 \pm 0,0005$          | $19,341 \pm 0,0005$          | $19,613 \pm 0,0005$          |
| 7            | $8,0540 \pm 0,00005$   | $19,613 \pm 0,0005$          | $19,029 \pm 0,0005$          | $19,303 \pm 0,0005$          |
| 8            | $7,9725 \pm 0,00005$   | $19,303 \pm 0,0005$          | $18,733 \pm 0,0005$          | $19,005 \pm 0,0005$          |
| 9            | $7,9455 \pm 0,00005$   | $19,005 \pm 0,0005$          | $18,450 \pm 0,0005$          | $18,718 \pm 0,0005$          |

## B Beregnede verdier

I Tabell B.1 vises den beregnede stoffmengden av vann og den beregnede overførte varmen fra spenningskilden. Disse verdiene er konstante gjennom hele eksperimentet.

**Tabell B.1:** Beregnede resultater som er konstante gjennom hele eksperimentet.

| Størrelse                                  | Verdi            | Enhet |
|--------------------------------------------|------------------|-------|
| Stoffmengde vann, $n_{\text{H}_2\text{O}}$ | $55,51 \pm 0,02$ | mol   |
| Overført varme, $q$                        | $1175 \pm 2$     | J     |

Videre i Tabell B.2 og Tabell B.3 vises beregnede verdier som varierer etter hver tilsats av  $\text{KNO}_3$  til løsningen. Disse resultatene samsvarer til tilsatsnumrene i Tabell A.3.

**Tabell B.2:** Tabellen viser gir en oversikt over beregnede temperaturendringer, varmekapasiteter til  $\text{KNO}_3$  og entalpiendring.

| Tilsats, k | $\Delta T_S$<br>[K]  | $\Delta T_R$<br>[K] | $C_p$<br>[kJ K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> ] | $\Delta H$<br>[kJ] |
|------------|----------------------|---------------------|-------------------------------------------------|--------------------|
| 1          | $-0,3350 \pm 0,0007$ | $0,2710 \pm 0,0007$ | $4,337 \pm 0,012$                               | $1,453 \pm 0,005$  |
| 2          | $-0,3200 \pm 0,0007$ | $0,2740 \pm 0,0007$ | $4,290 \pm 0,012$                               | $1,373 \pm 0,005$  |
| 3          | $-0,6220 \pm 0,0007$ | $0,2690 \pm 0,0007$ | $4,369 \pm 0,013$                               | $2,718 \pm 0,009$  |
| 4          | $-0,6120 \pm 0,0007$ | $0,2650 \pm 0,0007$ | $4,435 \pm 0,013$                               | $2,714 \pm 0,009$  |
| 5          | $-0,6090 \pm 0,0007$ | $0,2720 \pm 0,0007$ | $4,321 \pm 0,013$                               | $2,632 \pm 0,008$  |
| 6          | $-0,5970 \pm 0,0007$ | $0,2720 \pm 0,0007$ | $4,321 \pm 0,013$                               | $2,580 \pm 0,008$  |
| 7          | $-0,5840 \pm 0,0007$ | $0,0740 \pm 0,0007$ | $4,290 \pm 0,012$                               | $2,505 \pm 0,008$  |
| 8          | $-0,5700 \pm 0,0007$ | $0,2720 \pm 0,0007$ | $4,321 \pm 0,013$                               | $2,463 \pm 0,008$  |
| 9          | $-0,5550 \pm 0,0007$ | $0,2680 \pm 0,0007$ | $4,386 \pm 0,013$                               | $2,434 \pm 0,008$  |

**Tabell B.3:** Fremstilling av akkumulerte stoffmengder av  $\text{KNO}_3$ , akkumulerte blandingsentalpier og partielle molare entalpier til henholdsvis  $\text{KNO}_3$  og vann.

| Tilsats, k | $n^{\text{akk},(k)}(\text{KNO}_3)$<br>[mmol] | $\Delta_{\text{mix}}H$<br>[kJ] | $\Delta H_{\text{KNO}_3}$<br>[kJ mol <sup>-1</sup> ] | $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}$<br>[J mol <sup>-1</sup> ] |
|------------|----------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 1          | $39,115 \pm 0,013$                           | $1,453 \pm 0,005$              | $35,176 \pm 0,116$                                   | $1,387 \pm 0,125$                                         |
| 2          | $78,324 \pm 0,018$                           | $2,826 \pm 0,007$              | $34,844 \pm 0,118$                                   | $1,737 \pm 0,210$                                         |
| 3          | $157,080 \pm 0,011$                          | $5,543 \pm 0,015$              | $34,179 \pm 0,127$                                   | $3,141 \pm 0,448$                                         |
| 4          | $236,913 \pm 0,012$                          | $8,258 \pm 0,017$              | $33,505 \pm 0,140$                                   | $5,761 \pm 0,676$                                         |
| 5          | $316,075 \pm 0,014$                          | $10,889 \pm 0,018$             | $32,837 \pm 0,157$                                   | $9,193 \pm 0,956$                                         |
| 6          | $395,711 \pm 0,015$                          | $13,469 \pm 0,020$             | $32,164 \pm 0,177$                                   | $13,352 \pm 1,310$                                        |
| 7          | $475,372 \pm 0,016$                          | $15,974 \pm 0,021$             | $31,491 \pm 0,198$                                   | $18,084 \pm 1,737$                                        |
| 8          | $554,227 \pm 0,018$                          | $18,437 \pm 0,022$             | $30,825 \pm 0,220$                                   | $24,369 \pm 2,236$                                        |
| 9          | $632,815 \pm 0,019$                          | $20,871 \pm 0,023$             | $30,162 \pm 0,244$                                   | $32,142 \pm 2,809$                                        |

## C Beregninger

I dette avsnittet vil  $\text{H}_2\text{O}$  og  $\text{KNO}_3$  refereres til som henholdsvis komponent 1 og 2. Verdier som er brukt i beregningene er hentet fra Tabell A.1, Tabell A.2 og Tabell A.3. Resultatene av beregningene vises i Vedlegg B.

### C.1 Stoffmengder

I eksperimentet ble  $\text{KNO}_3$  løst i rent vann. Stoffmengden til vannet ble beregnet ved likningen under.

$$n_1 = \frac{\rho_1 V_1}{M_1} \quad (\text{C.1})$$

Videre ble stoffmengden til  $\text{KNO}_3$  beregnet ved

$$n^{\text{akk},k} = \frac{1}{M_2} \sum_{i=1}^k m_{2,i} \quad (\text{C.2})$$

hvor  $n^{\text{akk},k}$  står for den akkumulerte stoffmengden av  $\text{KNO}_3$  etter  $k$  tilsetninger av saltet.

### C.2 Temperaturendringer

Temperaturendringene ved tilsetning av  $\text{KNO}_3$  betegnes som  $\Delta T_S$ , og er beregnet ved

$$\Delta T_S = T_2 - T_1 \quad (\text{C.3})$$

hvor  $T_2$  er den målte stabile temperaturen etter at  $\text{KNO}_3$  ble tilsatt vannet og  $T_1$  er temperaturen før saltet ble tilsatt.

Videre betegnes temperaturendringene når løsningen ble tilført varme som  $\Delta T_R$ . Disse endringene er beregnet ved

$$\Delta T_R = T_3 - T_2 \quad (\text{C.4})$$

hvor  $T_3$  er den målte stabile temperaturen etter tilførsel av varme til løsningen.  $T_2$  er det samme som beskrevet over og dermed temperaturen rett før varmen ble tilført.

### C.3 Varmekapasitet

Formelen som er brukt til å finne varmekapasiteten,  $C_p^{(k)}$ , er likning (2.6) satt inn i likning (2.5).

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

### C.4 Blandingsentalpien

$\Delta_{\text{mix}} H$  for hver tilsats  $k$  ble bestemt ved likning (2.8). Det ble utført en andregradsregresjon av datapunktene for å finne et uttrykk for  $\Delta_{\text{mix}} H$ .

## C.5 Partielle molare entalpier

Ved å derivere regresjonsuttrykket for  $\Delta_{\text{mix}}H$ , ble uttrykket for den partielle molare entalpien til  $\text{KNO}_3$ ,  $\Delta H_{\text{KNO}_3}$ , funnet. Den partielle molare entalpien til vann,  $\Delta H_1$  ble beregnet ved likning (2.9).

For å finne de partielle molare entalpiene ved uendelig fortynning,  $\Delta H_{\text{KNO}_3}^0$  og  $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^0$ , ble regresjonsuttrykkene i avsnitt 4 interpolert til  $n_{\text{KNO}_3}^{\text{akk}} = 0$ .

## D Usikkerhetsberegninger

Feilforplantningen i beregningene ble beregnet ved Gauss' feilforplantingslov.

$$\delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2} \quad (\text{D.1})$$

Hvor  $f$  er en funksjon av variablene  $x_i$ ,  $\delta f$  er standardavviket til funksjonen  $f$  og  $\delta x_i$  er standardavviket i målingene av variablene  $x_i$ .

I dette avsnittet, vil  $\text{H}_2\text{O}$  og  $\text{KNO}_3$  refereres til som henholdsvis komponent 1 og 2. Verdi-er brukt i beregningene er hentet fra Tabell A.1, Tabell A.2, Tabell A.3 og Vedlegg B. De beregnede usikkerhetene vises i Vedlegg B.

### D.1 Temperaturendringer

Temperaturendringene ble beregnet ved likningene (C.3) og (C.4). Ved likning (D.1), blir  $\delta\Delta T$  gitt ved,

$$\delta\Delta T = \sqrt{2}\delta T \quad (\text{D.2})$$

### D.2 Overført varme

Varmen som ble overført til løsningen under oppvarming ble beregnet ved likning (2.6). Usikkerheten er gitt ved,

$$\delta q = \sqrt{\left( \frac{2Ut}{R} \delta U \right)^2 + \left( -\frac{U^2 t}{R^2} \delta R \right)^2} \quad (\text{D.3})$$

### D.3 Varmekapasitet

Varmekapasitetene i forsøket ble beregnet ved likning (C.5). Usikkerheten blir gitt ved,

$$\delta C_p = \sqrt{\left( \frac{2Ut}{R\Delta T_R} \delta U \right)^2 + \left( -\frac{U^2 t}{R^2 \Delta T_R} \delta R \right)^2 + \left( -\frac{U^2 t}{R(\Delta T_R)^2} \delta\Delta T_R \right)^2} \quad (\text{D.4})$$

### D.4 Stoffmengder

Stoffmengden av vann i løsningen ble beregnet ved likning (C.1). Usikkerheten i stoffmengden vann er gitt ved,

$$\delta n_1 = \frac{\rho_1}{M_1} \delta V \quad (\text{D.5})$$

Stoffmengden av  $\text{KNO}_3$  i løsningen ble beregnet ved likning (C.2). Usikkerheten i stoffmengden  $\text{KNO}_3$  ved tilsats  $k$  er gitt ved,

$$\delta n_2^{\text{akk}} = \frac{\sqrt{k}}{M_2} \delta m_2 \quad (\text{D.6})$$

## D.5 Partiell molar entalpi

Den partielle molare entalpian til  $\text{KNO}_3$  ble beregnet ved regresjonsuttrykket i avsnitt 4. Uttrykket er på formen  $an_2^{\text{akk}} + b$ . Ved Gauss' feilforplantningslov blir da,

$$\delta\Delta H_2 = \sqrt{(a\delta n_2^{\text{akk}})^2 + (n_2^{\text{akk}}\delta a)^2 + (\delta b)^2} \quad (\text{D.7})$$

Usikkerheten i  $\Delta H_{\text{KNO}_3}^0$  blir lik usikkerheten i koeffisient  $b$ .

Den partielle molare entalpian til vann ble beregnet ved likning (2.9). Usikkerheten er gitt ved,

$$\delta\Delta H_1 = \left[ \left( \frac{\delta\Delta_{\text{mix}}H}{n_1} \right)^2 + \left( \frac{n_2^{\text{akk}}}{n_1} \delta\Delta H_2 \right)^2 + \left( \frac{\Delta H_2}{n_1} \delta n_2^{\text{akk}} \right)^2 + \left( -\frac{n_2^{\text{akk}}}{n_1^2} \left( \frac{\Delta_{\text{mix}}H}{n_2^{\text{akk}}} - \Delta H_2 \right) \delta n_1 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{D.8})$$

I avsnitt 4 presenteres regresjonskurven til  $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}$  på formen  $a(n_2^{\text{akk}})^2 + bn_2^{\text{akk}} + c$ . Usikkerheten i  $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^0$  er lik usikkerheten i koeffisient  $c$ .

## D.6 Blandingsentalpi

$\Delta H$  for tilsats  $k$  av  $\text{KNO}_3$  ble beregnet ved likning (2.4). Usikkerheten er gitt ved,

$$\delta\Delta H^{(k)} = \sqrt{\left(-C_p^{(k)}\delta\Delta T_R\right)^2 + \left(-\Delta T_R\delta C_p^{(k)}\right)^2} \quad (\text{D.9})$$

$\Delta_{\text{mix}}H^{(k)}$  ble beregnet ved likning (2.8). Usikkerheten er gitt ved,

$$\delta\Delta_{\text{mix}}H^{(k)} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (\delta\Delta H^{(i)})^2} \quad (\text{D.10})$$