

Thermodynamische Processen

Academiejaar: 2020 - 2021

Prof. dr. Ir. Frederik Ronsse

Ir. Jonas De Smedt

Inhoud

Hoofdstuk 1: Inleiding	1
1.1 Wat is thermodynamica	1
1.2 Het systeem.....	1
1.3 Toestandsgrootheden	2
1.4 Intensieve en extensieve grootheden	2
1.5 Toestanden en eenheden	4
1.5.1 SI-eenheden	4
1.5.2 Conversie van eenheden	4
1.5.3 De standaard toestand.....	6
1.6 Toestands- en procesgrootheden	6
1.7 Thermodynamische begrippen	7
1.7.1 Thermodynamische systemen en systeem grenzen	7
1.8 De toestandsvergelijking	9
1.9 Thermodynamische processen.....	9
Hoofdstuk 2: Fasen en faseovergangen.....	11
2.1 Inleiding.....	11
2.2 Ideale gassen.....	14
2.2.1 Algemeenheden	14
2.2.2 De ideale gaswet.....	15
2.2.3 De wet van Dalton.....	16
2.2.4 De wet van Amagat	17
2.2.5 De kinetische gastheorie.....	18
2.2.6 De constante van Boltzmann.....	19
2.3 Reële gassen	20
2.3.1 Inleiding	20
2.3.2 Afwijking van ideaal gedrag	20
2.3.3 De viriaal-vergelijking	23
2.3.4 De van der Waals vergelijking	24
2.4 Ideale vaste en vloeistoffen	26
Hoofdstuk 3: Processen op ideale gassen.....	27
3.1 Warmte en arbeid: tekenconventies.....	27
3.2 Energie van een thermodynamisch systeem	29

3.2.1	Inwendige energie	29
3.2.2	Uitwendige energie	31
3.3	De eerste hoofdwet van de thermodynamica.....	32
3.3.1	Energie-uitwisseling bij gesloten systemen	32
3.3.2	Energie-uitwisseling bij stromingssystemen	37
3.4	Warmte en warmtecapaciteit	39
3.4.1	Warmte capaciteit bij constant volume	41
3.5	Enthalpie.....	43
3.5.1	Temperatuur afhankelijkheid van enthalpie	44
3.5.2	Verband tussen C_v en C_p	45
3.5.3	Typische waarden van $c_{p,m}$ en $c_{v,m}$	45
3.6	Reversibele processen op ideale gassen	47
3.6.1	Isochore reversibele toestandsverandering.....	47
3.6.2	Isobare reversibele expansie.....	47
3.6.3	Isotherme reversibele expansie	48
3.6.4	Adiabatische expansie en compressie van een ideaal gas	49
3.6.5	Andere reversibele toestandsveranderingen.....	51
3.7	De tweede hoofdwet van de thermodynamica.....	51
3.8	Kringprocessen: de Carnot cyclus	53
3.8.1	Werkingsprincipe	53
3.8.2	De Carnotfactor	56
3.8.3	Exergie en anergie.....	58
3.9	Entropie	59
3.9.1	Definitie.....	59
3.9.2	Entropie in een niet-adiabatisch systeem	60
3.9.3	Entropie in een adiabatisch systeem.....	60
3.9.4	Entropie bij processen op ideale gassen.....	61
3.10	Toestandsdiagrammen	63
3.10.1	Het T,s -diagram	63
3.10.2	Het h,s -diagram	68
3.10.3	Het $\log p,h$ -diagram.....	70
3.11	De derde hoofdwet van de thermodynamica.....	72
3.11.1	Entropie	72
3.11.2	Inwendige energie en enthalpie.....	73

Hoofdstuk 4: Toegepaste thermodynamische processen met ideale of bijna-ideale gassen	75
4.1 Thermodynamische cycli met uitwendige verbranding.....	75
4.1.1 De compressor.....	75
4.1.2 De ideale Braytoncyclus.....	78
4.1.3 De Stirling- en Ericssoncyclus	87
4.1.4 Toepassingen Brayton- en Stirlingcycli	96
4.2 Thermodynamische cycli met inwendige verbranding.....	104
4.2.1 Motortypes en –werking.....	105
4.2.2 Thermodynamische analyse	115
Hoofdstuk 5: Processen op ideale vaste en vloeistoffen	141
5.1 Inwendige energie.....	141
5.2 Enthalpie.....	143
5.3 Entropieverandering bij processen met ideale vaste/vloeistoffen	144
Hoofdstuk 6: Faseovergangen	146
6.1 Voelbare versus latente warmte.....	146
6.2 Het p, V -diagram bij faseovergangen	147
6.3 Entropieverandering bij faseovergang.....	150
6.4 Stoomtabellen	152
Hoofdstuk 7: Toegepaste thermodynamische processen met faseovergangen	155
7.1 De koelinstallatie	155
7.2 Beschrijving van de koelmachine.....	155
7.3 De koelkring volgens een omgekeerd Carnotkringproces.....	157
7.4 De efficiëntie van de koelkring volgens een omgekeerd Carnotkringproces	161
7.5 De gebruikelijke koelcyclus	161
7.5.1 Beschrijving van de gebruikelijke koelcyclus.....	161
7.5.2 De efficiëntie van de gebruikelijke koelcyclus	163
7.6 Koelmiddelen.....	163
7.6.1 Soorten koelmiddelen.....	163
7.6.2 Belangrijke eigenschappen van koelmiddelen	165
7.7 Praktische wijzigingen van de koelcyclus	169
7.7.1 Onderkoeling.....	169
7.7.2 Oververhitting	171
7.7.3 Regeneratieve cyclus.....	172
7.8 Meertrapscyclussen	173

7.9	De Rankine stoomcyclus	176
7.9.1	Beschrijving van de ideale Rankinecyclus	178
7.9.2	De efficiëntie van de Rankinecyclus	180
7.9.3	De ideale Rankinecyclus met oververhitting	181
7.9.4	De gebruikelijke Rankinecyclus.....	186
7.9.5	Ingrepen om de efficiëntie van de Rankinecyclus te verhogen.....	189
7.9.6	De ideale Rankine cyclus met herverhitting	197
7.9.7	De ideale regeneratieve Rankinecyclus.....	198
7.9.8	Toepassing in warmtekrachtkoppeling.....	203
7.9.9	De STEG-centrale	207
7.9.10	De organische Rankinecyclus	209
7.10	De superkritische Rankinecyclus	210
Hoofdstuk 8: Thermodynamische evenwichten: zuivere verbindingen.....		213
8.1	Thermodynamica vs dynamica	213
8.2	Gibbs vrije energie en chemische potentiaal	213
8.3	Spontaneïteit van processen of reacties	214
8.4	Verband tussen Gibbs vrije energie en de tweede hoofdwet.....	215
8.5	Chemische potentiaal.....	217
8.6	Afhankelijkheid van temperatuur en druk	217
8.7	Referentietoestanden voor Gibbs vrije energie	219
8.8	Gibbs vrije-energieverandering bij isotherme en isobare processen	220
8.9	Fase-evenwicht	221
8.10	Invloed van temperatuur bij standaarddruk: atmosferisch kookpunt.....	222
8.11	Invloed van druk bij gegeven temperatuur: evenwichtsdampdruk	223
8.12	Mathematica van fase-evenwicht: Clausius-Clapeyron.....	225
8.13	Clausius-Clapeyron voor sublimatie of verdamping	227
Hoofdstuk 9: Thermodynamische evenwichten: mengsels.....		229
9.1	Eénfasige en meërfasige mengsels	229
9.2	Partiële molaire grootheden.....	229
9.3	Mengsels van gassen	231
9.3.1	Mengsels van ideale gassen.....	231
9.3.2	Niet-ideale gassen	234
9.4	Ideale (verdunde) oplossingen.....	234
9.4.1	Oplossing van vluchtige verbindingen in niet-vluchtig solvent.....	234

9.4.2	Homogeen mengsel van twee vloeistoffen.....	237
9.4.3	Oplossing van niet-vluchtige componenten	243