4.4 Stoomketel

4.4.1 Definitie stoomketel

Een stoomketel is in het algemeen een gesloten stalen vat, zodanig ingericht dat daarin door de toevoer van warmte, uit water, onder druk stoom ontwikkeld kan worden. De vorm van de stoomketel kan zeer verschillend zijn en is afhankelijk van de toegepaste soort brandstof of hete gassen, de wijze waarop de verbrandingsgassen worden doorgevoerd, de stoomproductiecapaciteit alsmede de druk en de temperatuur.

De stoomwet definieert de stoomketel als volgt:

Een stoomketel is een toestel, waarin water wordt verhit door vuur of hete gassen, zodanig dat het water in dat toestel een temperatuur kan bereiken, die hoger is dan 100 ºC

De term 'hete gassen' in bovenstaande definitie is in deze leidraad niet aan de orde omdat voor zover bekend alle tot dusver bij gemalen toegepaste stoomketels direct gestookt zijn. Dit betekent dat de warmte in de ketel zelf wordt ontwikkeld.

4.4.2 Inrichting stoomketel

In het algemeen onderscheidt men in een stoomketel de volgende onderdelen.:

Waterruimte

De waterruimte is dat gedeelte van de stoomketel dat met water gevuld is en waar de uit de brandstof ontwikkelde warmte wordt overgedragen om stoom te vormen. Het water voorkomt dat de met de verbrandingsgassen in aanraking komende delen een te hoge temperatuur aannemen. Deze delen zullen des te beter gekoeld worden naarmate er een sterkere (natuurlijke) circulatie van het water in de ketel plaats vindt. De keteldelen moeten zowel water- als vuur- of rookgaszijdig schoon zijn om de warmteoverdracht niet te belemmeren en (plaatselijke) oververhitting te voorkomen. In dit verband noemen we roet, ketelsteen en eventueel met het ketelvoedingswater meegevoerde smeerolieresten.
Bij plotselinge sterke belastingwisseling en afhankelijk van de waterinhoud van de stoomketel kan het waterpeil snel stijgen of dalen. Een sterk toenemend stoomverbruik zorgt namelijk voor een drukdaling waardoor het aanwezige water sneller verdampt en het waterpeil daalt. Bij een sterk verminderde afname van de belasting vindt juist het omgekeerde plaats.

Stoomruimte

In de stoomruimte, het bovenste gedeelte van de stoomketel, verzamelen zich de in het water ontwikkelde dampbellen. De stoomruimte bevindt zich boven de waterruimte en heeft een zodanige afmeting dat enige waterpeil verandering zonder bezwaar kan worden toegelaten. Een te laag waterpeil brengt het gevaar mee van oververhitting van bepaalde keteldelen met als gevolg een ketelexplosie terwijl bij een te hoog peil, water met de stoom mee naar de stoommachine wordt gevoerd met als gevolg waterslag en daardoor machinebreuk.

Verwarmd oppervlak

Onder het verwarmd oppervlak, aangegeven met VO, wordt het aan de vuur- dan wel aan de gaszijde gemeten oppervlak van de ketel verstaan dat enerzijds wordt bestreken door de hete gassen en anderzijds door het water. Soms wordt over verwarmend oppervlak gesproken. Dit is het eveneens met VO aangeduide oppervlak maar dan waterzijde gemeten. Tussen het verwarmd oppervlak en het verwarmend oppervlak kan een verschil in grootte bestaan van wel 10 % -vergelijk dat met het binnen- en buitenoppervlak van een dikwandige buis- met als gevolg dat hierover misverstand kan ontstaan.

Vuurhaard

De vuurhaard is de ruimte waarin de voor de stoomvorming benodigde warmte wordt ontwikkeld door middel van verbranding van een daartoe geschikte brandstof. De vuurhaard hoeft zich niet noodzakelijkerwijs binnen de contour van de ketel te bevinden, echter voor zover bekend is dat bij stoominstallaties voor polderbemaling wel altijd het geval geweest. De buiten de contour variant wordt daarom hier verder buiten beschouwing gelaten. De vorm en de grootte van de vuurhaard zijn afhankelijk van het keteltype, de ketelcapaciteit, de soort brandstof en de wijze waarop de brandstof wordt verstookt. In de vuurhaard wordt een volkomen verbranding nagestreefd.

Roosters

In met vaste brandstoffen gestookte stoomketels zoals toegepast bij de polderbemaling wordt in de vuurgang een rooster aangebracht. Op dit rooster wordt de brandstof verbrand. De hiervoor benodigde lucht wordt in een bepaalde verhouding onder en boven het rooster toegelaten. Deze zogenoemde onder- en bovenlucht zorgt niet alleen voor de verbranding maar ook voor de afkoeling van de gietijzeren roosterstaven. Onder het roosteroppervlak (RO) wordt het totale werkzame oppervlak verstaan wat zich bij vaste roosters uitstrekt van de voorkant, het zogenoemde doodbed, tot de vuurbrug. Onder het zogenoemde vrije roosteroppervlak wordt de som van de luchtspleten tussen de roosterstaven verstaan; dit wordt uitgedrukt in procenten van het RO. De wijdte van de luchtspleten wordt bepaald door de kwaliteit en de soort te verstoken brandstof. Voor bijvoorbeeld magere, niet bakkende fijne steenkool moet het vrije oppervlak klein zijn. Bij stoomketels waar een vloeibare brandstof wordt verstookt, bijvoorbeeld stookolie, vervalt het rooster en wordt in het stookfront op de plaats van de vuurdeur een brander geplaatst. Aangetekend moet worden dat voor het verstoken van vaste brandstof (steenkolen) ontworpen stoomketels niet zonder meer kunnen worden omgebouwd voor het gebruik van een vloeibare brandstof.

Oververhitter

In de oververhitter wordt met behulp van de in de vuurhaard ontwikkelde hete gassen de in de stoomruimte gegenereerde verzadigde stoom bij gelijkblijvende druk tot de gewenste over-verhittingstemperatuur verhit. De oververhitter bestaat uit een buizenstelsel dat in de rookgasstroom van de ketel is geplaatst. Het spreekt voor zich dat hoe verder de oververhitter van de vuurhaard is verwijderd des te lager de te bereiken oververhittingstemperatuur is. Bij stoomketels voor stoominstallaties van gemalen is de oververhitter meestal tegen het achterfront geplaatst of bovenop de ketel. Gezorgd moet worden dat de oververhitter pijpen niet verbranden. Dit wordt bereikt door stoom af te nemen bijvoorbeeld door het af te blazen. Ook, en dat is de meest

voorkomende situatie bij gemaal-installaties, door de rookgasstroom om te leiden. Om voornoemde reden moet de veiligheid-voorziening van de oververhitter eerder afblazen dan die van de stoomruimte in de ketel.

Appendages

Onder de appendages worden die onderdelen verstaan die het (veilig) gebruik van de ketel mogelijk moeten maken. Hieronder vallen de peilglazen, de drukbeveiliging (veiligheidstoestellen) en de laagwaterbeveiliging (Blackfluit). Deze onderdelen zullen in deze leidraad elk apart behandeld worden waarbij de specifieke functie nader zal worden toegelicht

4.4.3 Begrippen en definities

Om aan stoominstallaties te kunnen rekenen dan wel deze onderling qua prestaties te kunnen vergelijken is in de loop der tijd een aantal begrippen ontwikkeld. De volgende veel gebruikte begrippen worden hierna nader aangeduid en toegelicht.

Ketelbelasting

Onder ketelbelasting wordt de hoeveelheid stoom verstaan die een ketel per uur produceert. Men drukt deze belasting uit in kilogrammen per uur bij kleine- en in tonnen per uur bij grote stoomketels, dus (kg/h of t/h).

Specifieke ketelbelasting

Omdat de ontwikkeling van stoom sterk afhankelijk is van het verwarmd oppervlak (VO) wordt hiermee een relatie gelegd. We noemen dit de specifieke ketelbelasting die we als volgt schrijven (kg/m2 VO. h).

Vuurhaardbelasting

Onder de vuurhaardbelasting wordt de totaal in de vuurhaard ontwikkelde energie verstaan, bestaande uit de warmteontwikkeling uit de brandstof en uit de warmte-inhoud van de aan de vuurhaard toegevoerde verbrandingslucht. Zij wordt uitgedrukt in (kcal/m^3).

Roosterbelasting

Onder roosterbelasting wordt het aantal kilogrammen steenkool verstaan dat per vierkante meter rooster oppervlak (RO) per uur verstookt kan worden. De roosterbelasting uitgedrukt in kg/m^2.VO.h is afhankelijk van de hoeveelheid verbrandingslucht die men kan toevoeren, de brandstofsoort en de kwaliteit daarvan (de stookwaarde), alsmede de toegestane maximale vuurhaardbelasting. Afhankelijk van de steenkool-soort is bij natuurlijke trek een roosterbelasting te bereiken van 80 - 120 kg/m^2.VO.h.

Verdampingsvoud

Onder het verdampingsvoud ook wel verdampingscijfer genoemd, verstaat men het aantal kg stoom van een bepaalde druk en temperatuur dat per kg brandstof uit het beschikbare ketelvoedingswater wordt gevormd. Het verdampingsvoud is een onbenoemd getal en zou als (kg/kg) kunnen worden geschreven.

Het verdampingsvoud is groter naarmate de stookwaarde van de toegepaste brandstof en het rendement van de stoomketel groter is. Het verdampingsvoud is bij gebruik van steenkool 8 à 10 kg/kg en bij gebruik van stookolie 11 à 14 kg/kg.

De energie, dus het aantal calorieën of tegenwoordig Joules, dat nodig is voor het vormen van 1 kg stoom van de vereiste druk en temperatuur uit het beschikbare ketelvoedingswater is zeer verschillend. Dit komt doordat de warmte inhoud (enthalpie) van zowel het ketelvoedingswater als de stoom verschillend kunnen zijn. Om toch de prestaties van stoomketels onderling te kunnen vergelijken wordt het verdampingsvoud in kg standaardstoom of normaalstoom weergegeven. De warmte-inhoud van 1 kg van de te beschouwen stoom wordt dan gedeeld door die van 1 kg normaalstoom dat wil zeggen 1 kg verzadigde stoom van 100 ºC gevormd uit water van 0 ºC. De enthalpie van normaalstoom is 638,9 kcal/kg.

$$\text{Normaalstoom [kg]} = \frac{\text{Enthalpie te beschouwen stoom } \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}\right]}{\text{Enthalpie normaal stoom } \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}\right]}$$

Voor de vorming van bijvoorbeeld oververhitte stoom van 310 ºC met een druk van 14 kg/cm^2 en een ketelvoedingswater temperatuur van 50 ºC is 680,7 kcal/kg nodig.
De hoeveelheid stoom uit dit voorbeeld komt dus overeen met 680,7 / 638,9 = 1,07 kg normaal stoom. De uitkomst is het getal waarmee het verdampingsvoud van de individuele stoomketel vermenigvuldigd moet worden om deze met andere stoomketels te kunnen vergelijken.

4.4.4 Warmte overdracht in de stoomketel

De warmte die vrijkomt bij de verbranding van brandstof kan op het water, de stoom of de lucht in een ketelinstallatie worden overgedragen door convectie, geleiding en door straling. In een ketelinstallatie gaat warmteoverdracht door geleiding steeds gepaard met die door convectie of stroming.

Convectie

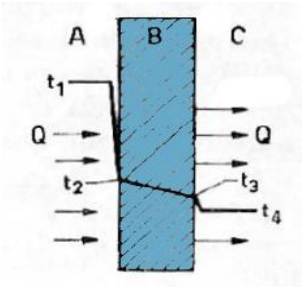
Warmte wordt overgedragen door convectie wanneer een (stof)deeltje (lucht, rookgas, water) waaraan een hoeveelheid warmte afgegeven is, zich naar een gebied begeeft met een lagere temperatuur en daar zijn warmte aan een andere stof afgeeft. Zo zal een rookgasdeeltje zijn warmte uit de vuurhaard meevoeren naar de wand van bijvoorbeeld de vuurgang, vlam- of waterpijp. De temperatuur van het ontvangende keteldeel zal daardoor stijgen.

Geleiding

Warmte wordt overgedragen door geleiding wanneer de stofdeeltjes van eenzelfde vast lichaam hun warmte aan elkaar doorgeven of wanneer twee lichamen met elkaar in aanraking zijn. De stofdeeltjes blijven hierbij aan hun plaats gebonden. Bij vloeistoffen en gassen treedt altijd verplaatsing op van de stofdeeltjes zodat van overdracht door geleiding geen sprake is. Bovendien geleiden vloeistoffen en gassen , uitgezonderd kwik, de warmte slecht.

Convectie en geleiding

Stel dat van een stof, die zich in ruimte A bevindt, een hoeveelheid warmte Q kcal/h door een wand B overgedragen moet worden aan de stof in de ruimte C. We nemen hierbij aan dat er een constante stroming van warmte in één richting plaats vindt, zodat het aantal calorieën, dat per vierkante meter aan de ene zijde door de wand wordt opgenomen, gelijk is aan het aantal calorieën dat door de wand aan de andere zijde wordt afgegeven. Dit proces kan worden onderscheiden in de volgende drie fasen.



1ste fase Warmteoverdracht van de stof in de ruimte A op de wand B

In de ruimte A heerst een temperatuur van t_1 °C. De warmte moet door de stof in A op de wand B worden overgedragen waarvan het oppervlak aan die zijde een temperatuur heeft van t_2 °C. Het aantal kilocalorieën Q dat per m² overgaat is recht evenredig met het temperatuursverschil tussen de stof in ruimte A en die van het wandoppervlak. Verder is deze afhankelijk van:

- Het materiaal waaruit de wand bestaat.
- De gesteldheid van het oppervlak(ruw, glad, vlak of gegolfd).
- De wijze waarop de warmte afgevende stof beweegt (rechtlijnige (laminair) of wervelende (turbulente) stroming.

Deze factoren vat men samen in de grootheid alpha (α_1) die de warmte-overgangscoëfficiënt wordt genoemd. Deze factor wordt uitgedrukt in kcal/m².°C.h. De hoeveelheid warmte die wordt overgedragen bedraagt dus:

$$Q = \alpha_1 \, (t_1 - t_2) \, [\mathrm{kcal/m^2.h}]$$

Het temperatuursverschil is:

$$t_1 - t_2 = \frac{Q}{\alpha_1} \, [°\mathrm{C}]$$

2e fase Warmteoverdracht door geleiding in de wand

De weerstand, die de wand biedt tegen het transport van de warmte, is recht evenredig met de dikte. Het geleidingsvermogen van de wand is dus recht evenredig met 1/dikte van het toegepaste wandmateriaal.

Rood koper geleidt warmte beter dan staal, terwijl poreuze stoffen zoals roet en ketelsteen, de warmte slecht geleiden. Het geleidingsvermogen van vloeistoffen, denk daarbij aan smeerolie die met het ketelwater kan worden meegevoerd, en gassen is eveneens zeer gering.

Het aantal kilocalorieën dat per m² oppervlak per m wandikte , per graad temperatuursverschil en per uur door een vaste stof wordt geleid noemen we de warmte-geleidingscoëfficiënt. We duiden deze grootheid aan met lambda (λ) met de notatie kcal/m².°C.h.

Is t_3 de temperatuur van het warmte afgevend oppervlak van de wand in graden Celsius en delta (δ) de dikte in meters dan geldt:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta}\,(t_2 - t_3)\ [\mathrm{kcal/m^2.h}]$$

Zodat het temperatuursverschil is:

$$t_2 - t_3 = \frac{Q}{\frac{\lambda}{\delta}}\ [°\mathrm{C}]$$

3e fase Warmteoverdracht van de wand B op de stof in de ruimte C

Het proces in deze fase komt overeen met die van de eerste fase met dien verstande dat er nu warmte overdracht in omgekeerde richting plaatsvindt namelijk van de wand naar een stof. Noemen we de warmte- overgangscoëfficiënt hier α_2 dan geldt, indien de wand evenveel warmte afgeeft, als hij heeft opgenomen:

$$Q = \alpha_2(t_3 - t_4)\ [\mathrm{kcal/m^2.h}]$$

Zodat hier het temperatuursverschil is:

$$t_3 - t_4 = \frac{Q}{\alpha_2}\ [°\mathrm{C}]$$

Tellen we de hiervoor afgeleide formules voor de temperatuursverschillen bij elkaar op dan ontstaat de volgende vergelijking:

$$t_1 - t_4 = Q\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\frac{\lambda}{\delta}} + \frac{1}{\alpha_2}\right)\ [°\mathrm{C}]$$

Of anders geschreven:

$$t_1 - t_4 = Q\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right)\ [°\mathrm{C}]$$

Stelt men nu

$$\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{k}$$

Dan is

$$t_1 - t_4 = Q\,\frac{1}{k}\ [°C]$$

En

$$Q = k\,(t_1 - t_4)\ [kcal/m^2.h]$$

In deze formule is k de totale warmte doorgangscoëfficiënt, die het aan tal kcal dat per uur weergeeft, per m² oppervlak en per ºC temperatuursverschil van een stof met hoge temperatuur, bijvoorbeeld rookgas, via een scheidingswand overgaat op een stof met een lagere temperatuur, bijvoorbeeld water stoom of lucht. De breuk 1/k stelt dan de som van de weerstanden voor die de warmte doorgang ontmoet.
Bezien we de grootte van de factoren die k bepalen dan blijkt α_1 van het rookgas op het verwarmd oppervlak (VO) groter naarmate:

- De rookgassnelheid groter is.
- De rookgastemperatuur hoger is.
- De diameter en de steek van de eventueel toegepaste vlampijpen kleiner is.
- De plaatsing van de pijpen (waterpijpketels), zigzag patroon in plaats van recht boven elkaar, of een gegolfde vuurgang die sterkere wervelingen veroorzaakt hebben eveneens een vergrotend effect .

Bij benadering is de warmte doorgangscoëfficiënt (α)

α van rookgas op vlampijpen	20	kcal/m².ºC.h
α van rookgas op zigzag geplaatste 1¼" waterpijpen (gassnelheid 8m/sec)	50	kcal/m².ºC.h
α van condenserende stoom op condensorpijpen (25mm)	4000	kcal/m².ºC.h
α van stilstaand water in pijpen	2000	kcal/m².ºC.h
α van een wand op niet kokend water (afhankelijk van de circulatie snelheid)	3000…5000	kcal/m².ºC.h

Bij benadering is de warmte geleidingscoëfficiënt (λ)

λ van staal	50	kcal/m.ºC.h
λ van koper	320	kcal/m.ºC.h
λ van ketelsteen	0,06...3	kcal/m.ºC.h
λ van asbest	0,19	kcal/m.ºC.h
λ van slakkenwol	0,05	kcal/m.ºC.h
λ van roet	0,1	kcal/m.ºC.h
λ van olie	0,1	kcal/m.ºC.h
λ van water	0,54	kcal/m.ºC.h
λ van ijs	0,79	kcal/m.ºC.h
λ van waterdamp	0,01405	kcal/m.ºC.h
λ van lucht	0,019	kcal/m.ºC.h

Uit de bovenstaande tabel kan worden opgemaakt dat de geleidingscoëfficiënten van roet en olie ongeveer even groot zijn en in hoge mate de warmtedoorgang belemmeren. In het geval van roet betekent dit dat de energie niet voor de stoomopwekking wordt benut. Olie belemmert de warmte afgifte aan het water wat betekent dat ter plaatse van de oliefilm het ketelmateriaal oververhit raakt hetgeen tot een ketelexplosie kan leiden. Ketelsteen bezit dezelfde onhebbelijkheid als smeerolie met daarenboven het risico dat delen plotseling los kunnen raken en dat door het relatief koude water een schokgolf teweeg kan worden gebracht die eveneens een ketelexplosie tot gevolg kan hebben. Het spreekt voor zich dat niet alleen uit economisch oogpunt maar ook voor een veilig stoombedrijf uiterste zorg aan de behandeling van het ketelwater moet worden besteed.

Straling

Warmte overdracht door straling vindt plaats door tussenkomst van de ether, een gewichtsloze denkbeeldige stof die de ruimte tussen de moleculen van alle stoffen opvult. De moleculen van een stof, bijvoorbeeld de gloeiende kolenlaag of hete rookgassen, veroorzaken een verstoring van de evenwichtstoestand van de ether. Een deel van het arbeidsvermogen van de moleculen van de stof wordt aan de ether afgegeven. Deze energie wordt overgedragen door de ether op een lichaam dat zich op afstand van de kolenlaag of rookgassen bevindt waardoor dit lichaam vervolgens een temperatuurverhoging ondergaat. Een en ander is te vergelijken met de zon die de aarde verwarmt. In de vuurhaard zal de warmte in hoofdzaak door straling worden overgedragen, verderop in de ketel, richting de schoorsteen zal de warmte meer door convectie en geleiding aan het water worden meegegeven.

In een vuurhaard geven niet alleen een groot aantal witgloeiende kooldeeltjes, maar ook de bij de verbranding gevormde waterdamp en kooldioxide (CO_2) warmte af. Ongekoelde delen, zoals metselwerk, kaatsen de warmte bijna geheel terug naar de vlammen en naar het V.O. Hierdoor daalt de temperatuur van de gasmassa.

De hoeveelheid warmte die door straling wordt overgebracht is recht evenredig met het verschil van de vierde machten van de absolute temperaturen T1 en T2 van respectievelijk de stralende gassen en het bestraalde lichaam. Verder is zij afhankelijk van de aard van het bestraalde oppervlak. Gladde of gepolijste oppervlakken stralen de warmte minder goed uit en absorberen de warmtestralen ook minder goed dan doffe, ruwe oppervlakken. Zo zal een nikkelen deel van een kolenkachel minder warmte uitstralen dan de zwarte schacht in zijn onmiddellijke nabijheid en zal daarom een hogere temperatuur hebben. In de formule is daarom de stralingsconstante c ingevoerd.

$$Q_s = c\left\{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right\}\ [\mathrm{kcal/m^2.h}]$$

De stralingsconstante c varieert van 4,95 voor een absoluut dofzwart lichaam tot 1,33 voor een gepolijst stuk staal. Metselwerk heeft bijvoorbeeld een stralingsconstante van 4,6.