

Stoomtechniek en Toepassingen



Voorwoord:

Voor u ligt het boek stoomtechniek en toepassingen. In het boek wordt de nadruk gelegd op de elementaire stoomtheorie.

Er wordt uitgebreid ingegaan op de soorten stoom, de stoomtabellen en de veel toegepaste diagrammen.

Verder worden in het boek behandeld: voorwarmers, de ontgasser, stoomkwaliteit en condenspotten. Vanaf hoofdstuk 5 zullen diverse toepassingen met stoom besproken worden.

Veel aandacht wordt besteed aan de berekeningen met stoom met betrekking tot warmtewisselaars, maar ook aan schema's, berekeningen van warmteoverdracht, het rendement en vooral aan verbetering van het rendement. In 2010 is op verzoek van gebruikers het boek uitgebreid met miswijzing van peilglazen en wat extra diagrammen. Bij deze uitgave zijn er wat kleine zaken aangepast.

Dank gaat uit naar Spirax Sarco die afbeeldingen en tekst beschikbaar heeft gesteld voor het tot stand komen van dit document.

Bij de derde druk is een ander type condenspot toegevoegd. Ondergetekende ontvangt gaarne suggesties die de kwaliteit en bruikbaarheid van dit boek kan vergroten.

Ing. A.J. de Koster

September 2012

Stoomtechniek
Adviesbureau de Koster v.o.f.
Dorpsstraat 5
4513 AL Hoofdplaat
Tel. 0117-348223
info@martechopleidingen.nl
www.martechopleidingen.nl

Illustraties : A. Visser
: J.A.M. de Koster

ISBN 978-90-78142-26-3

Eerste druk januari 2009
Tweede druk maart 2010
Tweede herziene druk februari 2011
Derde druk september 2012

© Adviesbureau de Koster, Dorpsstraat 5, 4513 AL Hoofdplaat. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vervoelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Dit is tevens van toepassing op gehele of gedeeltelijke bewerking van deze uitgave.

Hoewel dit boek met veel zorg is samengesteld, aanvaarden wij geen aansprakelijkheid voor schade ontstaan door eventuele fouten en / of onvolkomenheden in dit boek.

Afbeeldingen en tekst in hoofdstuk 10 zijn gebruikt van de Spirax Sarco website 'Steam Engineering Tutorials'
<http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials.asp>
Afbeeldingen en tekst zijn gebruikt met de toestemming van Spirax Sarco, copyright en intellectueel eigendom blijven van Spirax Sarco.

Inhoud

1.0	Stoom	7
1.1	Inleiding	7
1.2	Fasen	7
1.3	Dichtheid	8
1.3.1	Berekenen van het specifiek volume	9
1.4	De warmte in water	10
1.5	De warmte in stoom	11
1.6	De verdampingswarmte	13
1.7	Natte stoom	14
1.7.1	Voorbeelden	16
1.8	De soortelijke warmte	18
1.9	De entropie	19
1.9.1	Voorbeeld	23
1.9.2	Een andere benadering van de entropie	24
1.10	De stoomtabel	27
2.0	Het enthalpie-entropie diagram	33
2.1	De isobaar	35
2.2	De isotherm	35
2.3	De isochoor	36
2.4	De isopsychre	36
2.5	De isenthalp	37
2.6	De isentroop	37
2.7	De stoomcondities weergegeven in het h-s diagram	38
3.0	Het Temperatuur-entropie diagram	40
4.0	Stoomkwaliteit	42
4.1	Temperatuur en druk	42
4.2	Lucht en andere niet condenseerbare gassen	43
4.3	De hoeveelheid stoom per tijdseenheid	44
4.4	Reinheid van de stoom	44
4.5	Het dampgehalte van de stoom	46
4.6	Waterslag	47
5.0	Warmteoverdracht	48
5.1	Geleiding	48
5.2	Stroming (Convectie)	52
5.3	Afleiding formule convectie	54
5.3.1	Voorbeeld berekening van de k factor	55
5.3.2	Voorbeeld	56
5.4	De warmtewisselaar	58
5.5	Berekening warmteoverdracht oververhitter	62
5.5.1	Voorbeeld	62
6.0	Energieverbruik van tanks	64
6.1	Algemeen	64
6.2	Voorbeelden	65
7.0	Energieoverdracht in warmtewisselaars	67
7.1	Logaritmisch en rekenkundig temperatuurverschil	67
7.2	Rekenvoorbeeld 1	70
7.3	Rekenvoorbeeld 2	71

8.0	De ontgasser	74
8.1	De werking van de ontgasser, algemeen	75
8.2	De Stork voedingwaterontgasser	79
8.3	Gegevens van een willekeurige ontgasser	81
8.4	Wettelijke bepalingen van toepassing op de ontgasser	82
8.5	Theoretische beschouwing van de ontgasser	84
8.6	Rekenvoorbeeld Ontgasser	86
9.0	Schema's met componenten	89
9.1	Inleiding	89
9.2	Het tegendruksysteem	89
9.3	Het tegendruksysteem met aftapstoom	91
9.4	Het condensatiesysteem	92
9.5	Het condensatiesysteem met aftapstoom	93
9.6	Het Sankey diagram	94
10.0	Condensaat en condenspotten	95
10.1	Condensaatafvoer	95
10.2	Economie van de condensaatafvoer	96
10.2.1	Kosten door lekkende condenspot, rekenvoorbeeld	96
10.2.2	Kosten door naverdampen, rekenvoorbeeld	98
10.2.3	Onderkoeling bij tracing	99
10.3	Condenspotten	100
10.3.1	Mechanische condenspotten	101
10.3.2	Handmatig gestuurde condenspotten	104
10.3.3	Thermische of thermostatische condenspotten	105
10.3.4	Thermodynamische condenspotten	108
10.3.5	Samenvatting condenspotten	109
10.4	Keuze en opstelling condenspotten	110
10.5	Alternatieve condensaatafvoersystemen	110
10.6	Keuze van de condenspot bij stoomtracing	110
10.7	Diameter condensaatleiding	110
10.8	Ontwatering van stoomtransportleidingen	111
10.9	Restwarmte uit condensaat	112
10.10	Inspectie van condenspotten op doorgang van stoom	112
10.11	Corrosie en cavitatie	112
10.12	Condensaatpomp	113
10.13	De GEM orifice venturi condenspot	116
11.0	Veiligheid en Stoom	121
12.0	Het rendement	124
12.1	Voorbeeld	127
12.2	Warmtebesparing door isoleren van afsluiters	129
13.0	Rendementsverbetering	130
13.1	Inleiding	130
13.2	Het voorwarmen met behulp van aftapstoom	134
13.2.1	Het rendement en de brandstof	137
13.3	Toepassen van een hoge of lage keteldruk	139
13.4	Levering van elektriciteit en warmte	142
14.0	De zuighoogte van de pomp	146
14.1	Voorkomen van cavitatie	146
14.2	Het begrip NPSH	149
14.3	De NPSH toegepast op de hoogte van de ontgasser	152

15.0	Miswijzing van peilglazen	154
15.1	Inleiding	154
15.2	Peilglas of standpijp op de ontgasser	154
15.3	Voorbeeld	155
16.0	Theoretische achtergronden	157
16.1	De Black Box	157
16.2	Toepassing Black Box op een turbine	160
16.3	Toepassing Black Box op een afsluiter	162
17.0	Formuleblad	164
17.1	Grootheden en eenheden	166

10.9 Restwarmte uit condensaat

In het voorgaande is aangetoond, dat het verschijnsel naverdampen oneconomisch is. Al de thermische energie van condensaat boven 100 °C (bij atmosferische afvoer) gaat verloren. Het is zinvol om deze restwarmte alsnog te benutten. Door het condensaat af te voeren naar een gesloten ontspanningsvat kan de ontwikkelde stoom tengevolge van het naverdampen weer in een lage druk stoomnet benut worden. Stel we hebben condensaat, uit een stoomnet van 12 bar, dat we afvoeren naar een vat waar een druk van 3 bar wordt onderhouden. De ontwikkelde stoom tengevolge van het naverdampen wordt naar een lage druk stoomnet van 3 bar gevoerd. Het condensaat uit het vat wordt via een vlotter op peil gehouden en afgevoerd naar een atmosferische condensaatbak (warmwaterbak) in het ketelruim.

10.10 Inspectie van condenspotten op doorgang van stoom

Controle op het doorlaten van stoom is door temperatuurmeting niet mogelijk, althans niet bij de vlotter, emmer of thermodynamische condenspot. De temperatuur van het condensaat voor de condenspot is gelijk aan de temperatuur van de verzadigde stoom, die behoort bij de druk van het stoomnet. De temperatuur van het condensaat na de condenspot is bij atmosferische afvoer gelijk aan 100 °C. Zou stoom met het condensaat meegevoerd worden, dan meten we geen temperatuurverschil.

We zullen wel een temperatuurverhoging meten, wanneer alle condensaat verdampt is.

Bij de meeste condenspotten kan een kijkglas de mogelijkheid geven om controle uit te oefenen.

Door met een stethoscoop de condenspot af te luisteren is ook een goede methode.

Bij het stromen van stoom door de condenspot ontstaan trillingen welke boven onze gehoorrens liggen, in dit geval brengt soms een ultrasone detector uitkomst.

De beste methode is met behulp van een permanent opgestelde testkamer voor de condenspot. In deze testkamer wordt de geleidbaarheid van het condensaat gemeten. Bij aanwezigheid van condensaat meet een elektrode een elektrische stroomkring, als de elektrode door stoom omgeven is wordt geen elektrische stroomkring gemeten.

Een andere, wellicht verouderde maar doeltreffende methode, is om de afvoer van de condenspot met een korte leiding op een open afvoergoot aan te sluiten. De leiding na de condenspot moet dan druppelen en er moet een klein stoompluimpje op staan.

10.11 Corrosie en cavitatie

Veel onderhoud moet aan condensatiesystemen uitgevoerd worden als gevolg van corrosie. Lekkages van condenspotten worden veroorzaakt door waterslag en corrosie. Corrosie wordt vooral veroorzaakt door in de stoom aanwezige zuurstof en of kooldioxide.

Zuurstofcorrosie openbaart zich door putvorming van het materiaal.

Kooldioxidecorrosie openbaart zich door een gelijkmatig over het oppervlak verdeelde aantasting van het materiaal.

Zuurstof komt in het condensaat bij het ontluichten van stoom-condensaatleidingen en warmtewisselaars.

Kooldioxide kan in het condensaat komen, wanneer het suppletiewater door een slecht functionerende ionenwisselaar wordt aangemaakt.

Geleidbaarheid

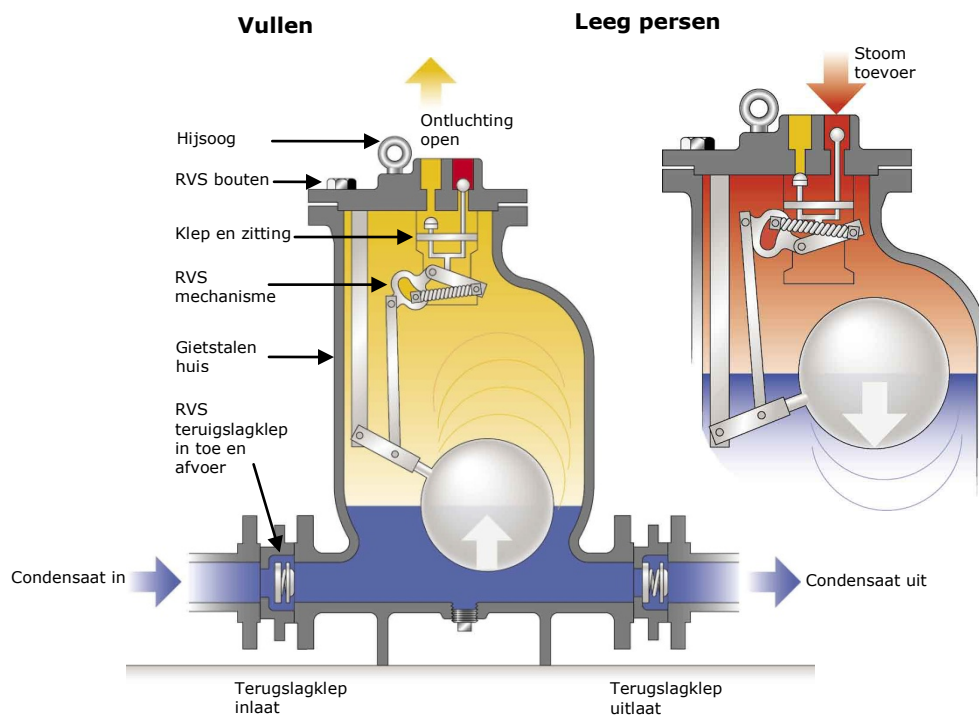
De ontgasser is bij uitstek geschikt om de schadelijke gassen te verwijderen. Een sterke putcorrosie wordt veroorzaakt door het verschijnsel cavitatie. Wanneer stoombellen imploderen, ontstaat ter plaatse een zeer hoge druk op het materiaal, met als gevolg een putje ter grootte van een speldenknop.

Lekke condenspotten, dus condenspotten die stoom doorlaten, kunnen ernstige schade aan leidingen berokkenen. De natte stoom die doorgelaten wordt, zorgt vooral in bochten voor een "bombardement" van waterdruppeltjes op dat stuk leiding. Binnen zeer korte tijd wordt deze leiding ter plaatse "doorgesneden" door de waterdruppels.

10.12 Condensaatpomp

De condensaatpompen worden gebruikt om condensaat uit warmtewisselaars te verzamelen, om dit vervolgens, met behulp van stoom, via het condensaatafvoerleidingnetwerk naar een verzamelvat of flashtank te persen.

Voor een beschrijving van de werking zie afbeelding 16.



Afbeelding 16. Doorsnede condensaatpomp, Spirax Sarco.

In elke met stoom verwarmde warmtewisselaar kan bij een verminderde warmtevraag de stoomdruk beneden de 1 bara dalen. Als de stoomdruk afneemt is er meestal niet voldoende drukverschil om het verzamelde condensaat uit de warmtewisselaar te drukken, dit fenomeen doet zich voor als de stoomklep sluit. Er vormt zich op dat moment zeer snel een vacuüm in de warmtewisselaar. Voldoende afvoer van condensaat is dan niet meer mogelijk. Het probleem wordt nog erger als het condensaat naar een verzamelvat onder druk moet. Het gevolg hiervan kan waterslag zijn. Om dit probleem te omzeilen kan gebruik gemaakt worden van een zogenaamde condensaatpomp.

De werking van de condensaatpomp, zie afbeelding 16:**Vullen:**

Tijdens het vullen is de inlaat terugslagklep geopend en de afvoer terugslagklep gesloten. De ontluchtingsklep is nu geopend.

Pompen:

De vlotter stijgt met het niveau van het condensaat tot het mechanisme in werking komt. Op het omschakelpunt sluit de ontluchting en opent de stoomtoevoer, hierdoor sluit de inlaat terugslagklep.

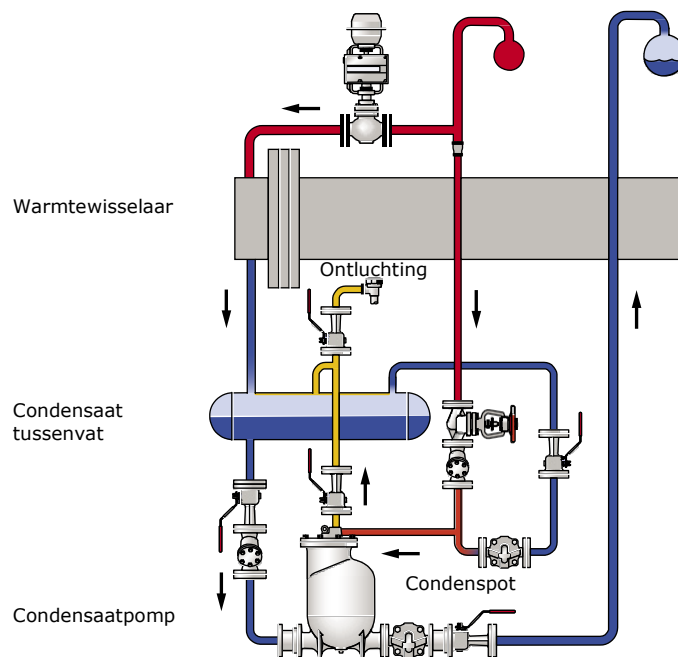
Einde pompen:

De vlotter daalt, omdat het condensaat wordt uitgedreven. De inlaat terugslagklep staat nog dicht.

Opnieuw vullen:

De stoomtoevoerklep sluit weer en de ontluchting opent. De inlaatterugslagklep is weer open en de cyclus begint van vooraf aan.

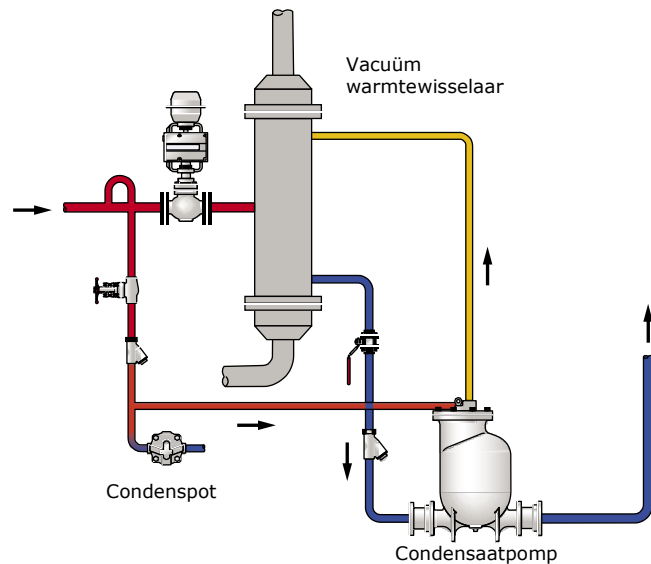
Op afbeelding 17 is een schema weergegeven van een opstelling van een warmtewisselaar met condensaatpomp. In de warmtewisselaar condenseert de stoom tot water, condensaat.



Afbeelding 17. Warmtewisselaar met condensaatpomp, gesloten systeem. Bron Spirax Sarco.

Het condensaat loopt in de condensaatverzamelvat en vandaar loopt het naar de condensaatpomp. Als de condensaatpomp vol is wordt er aan de condensaatpomp stoom toegevoerd en wordt het condensaat uit de pomp weggedrukt naar de condensaatleiding. Dankzij het tussenvat is een constante afvoer van condensaat mogelijk.

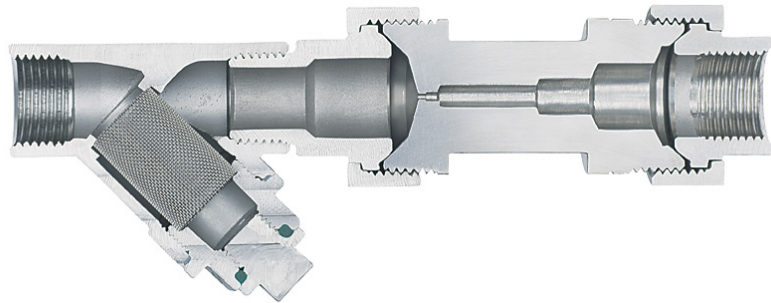
Op afbeelding 18 is een schema weergegeven van een warmtewisselaar die met onderdruk, vacuüm, werkt. De werking van het systeem spreekt voor zich. Bij dit systeem is het nadeel dat tijdens het wegpompen van het condensaat de warmtewisselaar voor een deel vol loopt met condensaat.



Afbeelding 18. Vacuüm warmtewisselaar met condensaatpomp. Bron Spirax Sarco.

10.13 De GEM orifice venturi condenspot

Op afbeelding 19 is een tekening te zien van een venturi condenspot. Het eerste wat opvalt aan deze condenspot is dat er geen enkel bewegend deel in de condenspot aanwezig is, dit is een zeer sterk punt, want wat er niet is, gaat ook niet kapot. Deze condenspot is door zijn constructie bedrijfszekerder dan een condenspot met bewegende delen. Het enige nadeel aan deze condenspot is, dat hij voor elke warmtewisselaar apart moet uitgerekend worden, voor elke specifieke capaciteit een specifieke condenspot.



Afbeelding 19. Orifice venturi condenspot met filter. Bron GEM Ltd.

Dichtheid

De werking van de orifice venturi condenspot is vooral gebaseerd op het verschil in dichtheid tussen water en stoom. Bij lage drukken is de dichtheid van condensaat vele malen groter dan die van stoom.

Bij een druk van 5 bara is de dichtheid van kokend water volgens de stoomtabel, $915,08 \text{ kg/m}^3$, de dichtheid van verzadigde stoom bedraagt bij deze druk $2,66 \text{ kg/m}^3$.

Het verschil in dichtheid wordt hier:

$$\frac{\rho_{\text{water}}}{\rho_{\text{stoom}}} = \frac{915,08}{2,66} = 344$$

Bij een druk van 3 bara is de dichtheid van kokend water volgens de stoomtabel, $931,53 \text{ kg/m}^3$, de dichtheid van verzadigde stoom bedraagt bij deze druk $1,65 \text{ kg/m}^3$.

Het verschil in dichtheid wordt hier:

$$\frac{\rho_{\text{water}}}{\rho_{\text{stoom}}} = \frac{931,53}{1,65} = 564$$

Kortom, hoe lager de druk is, hoe groter het verschil is tussen de dichtheid van kokend water en verzadigde stoom, dit kan zelfs oplopen tot ongeveer 1000.

Als er geen condensaat aanwezig zou zijn, dan zou de stoom met een grote snelheid door de orifice bewegen. Hoe groter de drukval van de stoom over de orifice is, hoe groter de snelheid van de stoom zal zijn. Als voorbeeld nemen we verzadigde stoom van 3 bara en een tegendruk van 1 bara.

De stoomdruk, van de verzadigde stoom, voor de orifice is 3 bara en de druk na de orifice is 1 bara, dan volgt voor de enthalpie van de verzadigde stoom bij 3 bara: $h_{\text{vs } 3} = 2724,7 \text{ kJ/kg}$ en de enthalpie van de verzadigde stoom bij 1 bara: $h_{\text{vs } 1} = 2675,4 \text{ kJ/kg}$

De theoretische stoomsnelheid door de orifice wordt dan:

$$c_0 = \sqrt{2000 \cdot \Delta h_0 + c_a^2}$$

$$c_0 = \sqrt{2000 \cdot (2724,7 - 2675,4) + 0^2} = 314 \text{ m/s}$$

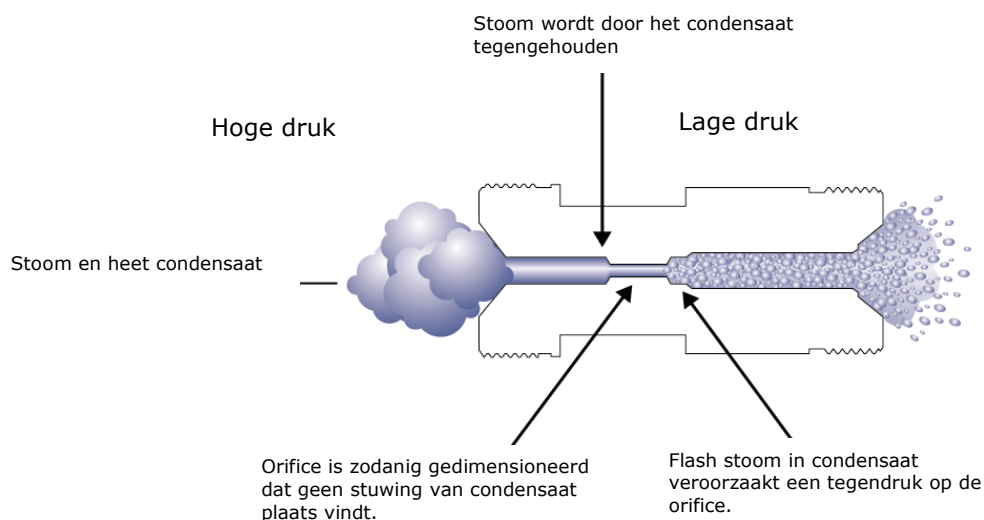
Lagere snelheid

In het geval dat beide media aanwezig zijn, wat in principe bij verzadigde stoomsystemen altijd het geval is, zal het veel dichtere condensaat de stoom tegenhouden of verdringen. Het gevolg hiervan is dat er geen verse stoom door de orifice condenspot zal lekken. Het condensaat zal in elk geval met een veel lagere snelheid door de orifice stromen dan stoom zou doen als er geen condensaat aanwezig zou zijn.

Stel dat de orifice een doortocht heeft van 3 mm en er moet condensaat doorheen dat een druk heeft van 3 bara en een tegendruk van 1 bara, dan volgt voor de theoretische snelheid van het condensaat door de orifice:

$$c = \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot v} = \sqrt{2 \cdot (3 - 1) \cdot 10^5 \cdot 0,0010735} = 20,2 \text{ m/s}$$

Aangezien beide berekeningen slechts ter illustratie dienen is wel duidelijk dat het condensaat, door de lagere snelheid, de stoom als het ware tegenhoudt, dit is weergegeven op afbeelding 20.



Afbeelding 20. Werking venturi condenspot. Bron GEM Ltd.

Schijf met gat

De eerste types orifice condenspotten werden in de jaren 60 ontwikkeld voor de Amerikaanse marine om de betrouwbaarheid en de beschikbaarheid van het stoom en condensaatstelsel aan boord van schepen te verhogen en een eind te maken aan de grote stoomverliezen door niet of slecht werkende condenspotten. De orifice condenspot bestond in principe uit niets anders dan een schijf met een gat erin. Daarmee hadden deze orifice condenspotten een vrijwel vaste condensaat afvoercapaciteit. Op leidingontwateringen, met een constante capaciteit, was dit een groot succes. Werd een schip weer in de vaart gebracht, dan werden bij opstart de stoomleidingen met de hand ontwaterd.

In de meeste gevallen waar men te maken heeft met een variabel aanbod van condensaat is het niet praktisch om bij elke opstart en in geval van deellastcondities de condensaatafvoer met de hand te regelen.

Daarom is de orifice venturi condenspot uitgevoerd met een vaste orifice en een getrapte venturi, ook hier weer zonder bewegende delen en voor variabele belastingen geschikt.

Is het systeem eenmaal opgewarmd dan zal een percentage van het inmiddels warme condensaat na het passeren van de orifice flashen. Deze flashstoom ofwel damp of ontspanningsstoom veroorzaakt turbulentie en een lokale stromingweerstand na de condenspot. Daarbij zal het snel expanderende medium accelereren in de venturi van de condenspot, zie hiervoor afbeelding 20.

Net zoals bij een straalmotor zal volgens de derde wet van Newton op elke actie een gelijke reactie in tegengestelde richting volgen en zal door dit effect een lokale tegendruk op de orifice opgebouwd worden en daarmee de capaciteit van de condenspot verminderen. Dus de mate van flashstoom bepaald in grote mate het regelbereik van de condenspot.

De orifice venturi condenspot wordt gedimensioneerd op de maximale condensaatflow tijdens warme bedrijfscondities wanneer de tegendruk de condensaatstroom begrensd. Echter bij koude opstart, of bij onderkoeld condensaat in geval van deellastcondities, is er geen of minder flashstoom in de venturi. Onder deze condities is er geen of minder tegendruk van de flashstoom en zal het condensaat met minder weerstand door de venturi stromen. De capaciteit van de venturi condenspot zal dan onmiddellijk automatisch toenemen en in geval van koud condensaat zelfs met een factor 2 à 3 keer de capaciteit dan bij warme condities.

Ten gevolge hiervan heeft de venturi condenspot een variabele capaciteit zonder gebruik te hoeven maken van een klepmechanisme. Verlies van verse stoom door condenspotten wordt hiermee permanent voorkomen waardoor het rendement en de betrouwbaarheid van stoomsystemen wordt verhoogd en energie bespaard wordt. Deze condenspotten zijn geschikt voor zowel verzadigde als oververhitte stoom en kunnen in principe op alle plaatsen waar conventionele condenspotten gebruikt worden toegepast worden.

Deze condenspot moet ofwel verticaal met de stromingsrichting naar beneden gericht ofwel horizontaal geïnstalleerd worden. Elke condenspot wordt voorzien van een pijl die de stromingsrichting van het condensaat aangeeft. Indien mogelijk de condenspot met de uittredezijde zo ver mogelijk van een bocht monteren.

0,4 mm

Vóór elke condenspot moet een filter geïnstalleerd worden om interne vervuiling en verstopping van de condenspot tegen te gaan. Indien deze condenspotten niet standaard van een filter voorzien zijn, dan moet er een filter met minimaal maaswijdte 40 mesh (0,4 mm) gemonteerd worden.

Deze condenspotten zijn er in verschillende uitvoeringen, ze zijn leverbaar met schroefkoppelingen voor fitwerk, voor flenstoepassingen, voor lastoepassingen enzovoort, een voorbeeld is weergegeven op afbeelding 21 en 22. De condenspotten zoals weergegeven op afbeelding 21 worden tussen twee flenzen ingeklemd.