

Beskedent overtryk gav spektakulære følger

For at undertrykke generende opskumning blev en tank sat under et såkaldt "meget beskedent overtryk". Pludselig svigtede samlingen i bunden. Tanken nåede en højde på 30 m og faldt ned og knuste en varevogn. Uheldet viser, at et stort volumen af gas under lavt tryk indeholder en ikke uvæsentlig mængde energi.

Af Frank Huess Hedlund

Under brygning af øl forøges gærcellemassen mellem tre og seks gange. Gæren bundfæles, før øllet lagres, og den overskydende mængde bortskaffes som gærfløde. Det er et restprodukt med et relativt højt tørstofindhold, og konsistensen er både klæbrig og viskøs.

Gær har et højt indhold af protein, vigtige aminosyrer og vitaminer og er derfor velegnet som foderstof til en-mavede dyr, særligt til svin, hvor gærfløde kan erstatte en del af den traditionelle sojaskrå. Baseret på proteinsammensætning og tørstofindhold er det vurderet, at 14 liter gærfløde kan erstatte 1 kg sojaskrå.

Gærfløde indeholder godt nok 2-3 procent alkohol, men det skulle efter sigende kun have gavnlige afledte effekter, idet svinene bliver sløve og derfor bedre er i stand til at modstå stresspåvirkningerne i de moderne og effektive svinestalde [1].

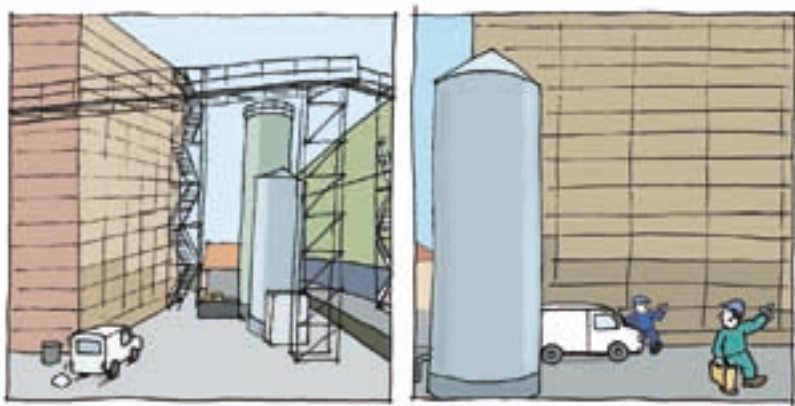
I nogle temmelig bemærkelsesværdige danske forsøg i 1980'erne [2] med fodring af svin med gærfløde var alkoholindtaget ikke helt ubetydeligt, i runde tal hvad der svarer til en flaske vin om dagen, hvilket i sig selv nok vil have en døsigt virkning på mange læsere af Dansk Kemi. Hvis der korrigeres for kropsvægt, svarer det til imponerende cirka 2½ flaske vin om dagen for en person på 80 kg. Her er det sikkert en fordel med fire ben, og det er ikke helt uforståeligt, at svinene hyppigere lagde sig til at sove efter måltidet, set i forhold til svinene i kontrolgruppen uden gærfløde.

Gærfløde anvendes ikke længere direkte i svinefoderet, i hvert fald ikke i stor udstrækning – i stedet inddampes den til et pulver som eventuelt videreforarbejdes til proteinpiller. Gærfløden var svær at styre. Der var praktiske problemer med store variationer i tørstofindholdet fra parti til parti, og der kunne være et tørstoftab på hele 30% efter bare 14 dages opbevaring, selvom gærfløden var både pasteuriseret og konserveret med propionsyre.

Og her er vi ved et af problemerne med gærfløde: den er både et biologisk aktivt stof og et glimrende vækstmedium for uønskede mikrober. Selvom producenter af gærfløde søger at afsætte restproduktet så hurtigt som muligt, kan der være bøvl med plagsomme opskumninger i tankene.

"Meget beskedent overtryk"

Løsningen på denne gene ligger lige for: hvorfor ikke undertrykke opskumning ved at sætte gærflødetanken under et "meget beskedent overtryk", for eksempel 10 kPa (0.1 bar), når bryggeriet allerede har vidt forgrenet rørsystem med steril



Figur 1. To teknikere på nabobygningens tag skulle netop til at servicere et anlæg, da de hørte et hult dunk. De vendte sig om og så en stor tank skyde lodret op, så bunden løftede sig højere end taget på den modstående bygning. Tanken landede derefter oven på deres bil, som de netop havde forladt. Illustration: Jens Vox.

trykluft. Dette overtryk er jo så lavt, sagde en produktionschef på et bryggeri, at det er "næsten ingenting". Sandt nok er det et meget lille overtryk. Med lungernes kraft alene kan mænd snildt præstere dette overtryk, kvinder lige knap nok.

Hvis tanken tømmes hyppigt, netop for at undgå uønsket vækst og opskumning, så tanken sjældent når over 50% fyldning, så kan overtryksventilen med fordel stilles til 20 kPa, hvorved forbruget af steril trykluft bliver meget lille, måske endda nul i lange perioder. Og 20 kPa er stadig et meget lille overtryk. I drikkevareindustrien håndteres enorme mængder kulsyreholdige drikke, under tryk der er mindst ti gange højere. Trykket i en flaske champagne, som godt nok er i den høje ende, kan være 500-600 kPa.

Lovkrav

Lovkravsmæssigt er der ikke de store problemer med et beskedent overtryk i området 10-20 kPa. Det europæiske direktiv for trykbærende udstyr (PED) træder først i kraft ved overtryk større end 50 kPa. For at undgå at blive omfattet af dette direktiv, og ikke mindst dets dokumentationsbyrde, er det almindelig praksis i industrien at installere en sprængplade som ultimativ overtryksbeskyttelse. Derved sikres, at trykket aldrig overstiger 50 kPa.

En sprængplade er en membran, der er indspændt mellem to specialflanger, som åbner (sprænger) ved et veldefineret overtryk. Modsat en sikkerhedsventil er den ikke selvluukkende,

Overtryk	Exergy kan løfte tankens tyngdepunkt med
10 kPa	0.5 m
20 kPa	2.4 m
30 kPa	5.4 m
40 kPa	9.5 m
50 kPa	15 m
60 kPa	21 m
70 kPa	27 m

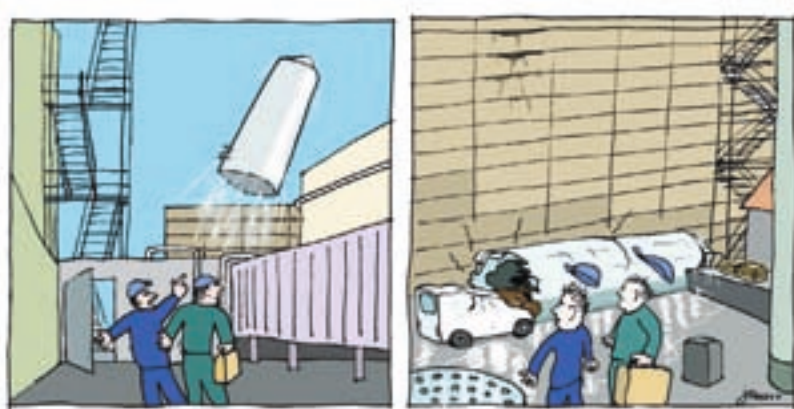
Tabel 1. Beregnet løftehøjde af en tom 90 m³ tank på 4 tons for forskellige beskedne overtryk af luft.

Fakta

Der er foregået en del ulykker i Danmark. Men der er ikke tradition for efterforskning og systematisk vidensdeling. Med ganske få undtagelser er dyrt høstede erfaringer i fare for at blive glemt.

Santayana har sagt, at de, der ikke kender historien, er dømt til at gentage den.

Artiklen er den femte i en serie, som vil råde bod på denne sorte plet ved at beskrive tidligere hændelser udvalgt for deres læringspotentiale.



og en sprængplade kan kun anvendes én gang. På grund af sin simple konstruktion og få komponenter anses sprængplader ofte for at have en højere pålidelighed end sikkerhedsventiler.

Der er flere sprængplader på markedet med brudtryk lige under 50 kPa, netop tiltænkt trykbeholderdirektivet, således at trykket aldrig overstiger direktivets tærskeltryk.

Gærflødesystemet

På et dansk bryggeri flyttes overskudsgær fra mange forskellige gæringstanke først til en mindre mellembeholder, der står indendørs, og dernæst til en stor ståltank placeret udenfor. Den lille beholder er tryksat til 100 kPa med trykluft. Når beholderen skal tømmes, starter en operatør en sekvens, hvor en ventil i bundstrengen åbner, så tryklufte tvinger gæren ud i den store tank. Ventilen lukker igen, når signal fra en niveauføler indikerer, at beholderen er tom.

En trykreduktionsventil sikrer, at den store tank altid er tryksat til minimum 10 kPa. Når niveauet i tanken stiger, virker væsken som stempel, der komprimerer gassen over væsken. En fjederbelastet ventil åbner ved 20 kPa. Afhængig af fyldningsgrad svinger driftstrykket derfor mellem 10 og 20 kPa.

Tanken er endvidere beskyttet med en sprængplade med et certificeret åbningstryk på 43-49 kPa ved 22°C, hvilket sikrer, at tanken ikke er omfattet af trykbeholderbekendtgørelsen.

Uheldet

På uheldsdagen var den store tank kort forinden blevet tømt og den første portion overskudsgær fra den lille beholder skulle overføres til gærflødetanken. To teknikere fra et eksternt firma ankom for at servicere noget udstyr på taget af en nabobygning. De parkerede deres bil over for gærflødetanken.

Kort efter, at de var kommet op på taget, hørte de et hult

dunk eller puf. De vendte sig og så den store gærflødetank skyde lodret op i luften og falde ned igen. De skyndte sig ned for at se, hvad der var sket, og ser, at tanken ligger oven på den bil, de netop havde forladt.

Den overvejende sandsynlige årsag til uheldet er, at niveauføleren i bunden af den lille beholder er svigtet, således at ventilen ikke har fået signal til at lukke. Derved har trykluft kunnet strømme ind i den store tank.

Niveauføleren var af svingningselementtypen. Den virker ved, at en stav eller en gaffel vibrerer med sin egenfrekvens. Egenfrekvensen afhænger af, om gaffen sidder frit eller er dækket af et medie. Niveauføleren kan tænkes at have svigtet, hvis en klump af særlig klæbrig gærfløde har pakket sig omkring sensoren.

Målløs

De to teknikere var naturligvis målløse over at se, at deres bil pludselig lå under en fire tons tung tank. Og det samme var folk på bryggeriet. Hvordan i alverden kunne det dog ske? Tankens sprængplade var intakt, og undersøgelser viste, at den fjederbelastede ventil åbnede, som den skulle. Tanken havde jo kun været under "et ganske lille overtryk".

Og her er vi ved et meget vigtigt læringspunkt af denne hændelse: overtryk som vi normalt ikke bekymrer os synderligt om, kan faktisk frigive store energimængder, hvis volumenet er tilstrækkelig stort. Volumen af tryksat gas var netop stort i denne situation, blandt andet fordi tanken lige var blevet tømt.

Exergi

Hvor meget energi indeholder en tryksat gas? (Læsere, som er skrappe til termodynamik, kan med fordel springe dette afsnit over).

Idealgasloven $PV=nRT$ er velkendt. Højresiden indeholder gaskonstanten R med enheden $J/mol/°K$. Ved multiplikation med antal mol (n) og temperaturen (T) har højresiden enheden energi (Joule). Derfor må produktet af tryk (P) og volumen (V) på venstresiden også udtrykke en energimængde. Men hele denne mængde (indre) energi kan ikke umiddelbart omsættes til mekanisk energi (arbejde), fordi en tryksat ekspanderende gas også skal bruge energi på at skubbe den omgivende atmosfære væk.

Dette udtrykkes i begrebet *exergi*, som er den maksimale mængde mekanisk energi (arbejde), der kan fås fra en ekspanderende gas, der kommer i ligevægt med omgivelsernes konstante tryk. Da et trykbeholdersvigt er en hurtig hændelse, er processen med god tilnærmelse adiabatisk, uden udveks-

ling af varme med omgivelserne. Det maksimale arbejde, den ekspanderende gas kan udføre, er da givet ved den isentropiske exergi, E .

Heldigvis tillader pladshensyn ikke de store udgydelser, men det kan "let" vises [3] at:

$$E = \frac{\gamma}{\gamma - 1} p_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right] - V_1 (p_1 - p_a)$$

hvor γ er forholdet mellem de specifikke varmekapaciteter C_p/C_v , som for luft er 1.4, og indeks 1 og a (ambient) er begyndelses- og sluttetilstanden. Alle enheder i SI.

Energiindhold i trykluft

Det lykkedes at komme i kontakt med den ene af de to teknikere på taget, som er de eneste øjenvidner til hændelsen. Han huskede stadig episoden meget tydeligt og var sikker på, at tanken skød så højt op i luften, at bunden klart løftede sig højere end nabobygningens tag. Nabobygningen er cirka 19 m høj. Da selve tanken er otte m høj, og der har hængt nogle plader fra isoleringskappen på undersiden af tanken, har tankens top nok nået en højde på cirka 30 m.¹

Exergibetraktninger [4] giver, at det indre overtryk i tanken derfor har været af størrelsesordenen 60 kPa.

Det vil muligvis overraske en del læsere af Dansk Kemi, at et så beskedent overtryk kan få en stor tank til at svigte så spektakulært, det overraskede i hvert fald undertegnede forfatter.

Det kan her være en passende anledning til at understrege vigtigheden af ikke at trykprøve udstyr med et kompressibelt medie, da konsekvenserne ved et eventuelt svigt er voldsomme. Trykprøvninger udføres sikrest med inkompressible medier, eksempelvis vand.

Trykbeholderbekendtgørelsen

Trykbeholderbekendtgørelsen, som implementerer det europæiske trykbeholderdirektiv (PED), omfatter som tidligere nævnt udstyr med et tryk på over 50 kPa. For at undgå at blive omfattet af denne bekendtgørelse, er det normal praksis at overtryksbeskytte udstyret med en sprængplade, der åbner lige under 50 kPa.

Men som det ses af tabel 1, vil selv væsentlig lavere overtryk end bekendtgørelsens arbitrære tærskelværdi på 50 kPa stadig kunne løfte tanken til en anseelig højde. Hvis driftstrykket i tanken er væsentlig lavere end 50 kPa, vil det være en sikkerhedsmæssig fordel at specificere sprængpladens åbningstryk lavere, i dette tilfælde eksempelvis 25 kPa, i stedet for at vælge en standard "trykbeholderdirektivsprængplade". Derved reduceres farepotentialer, hvis tanken skulle svigte.

Konklusion

Denne hændelse indeholder flere vigtige læringspunkter:

1. Det kan være nødvendigt at sætte tanke under overtryk af forskellige årsager, eksempelvis miljøkrav, for at installere filtre eller andet udstyr til at begrænse emission af VOC (Volatile Organic Compounds), lugt eller andet. Men mange eksisterende tanke er ikke designet til overtryk, og der kan på grund af tankens alder mangle information om dens evne til at modstå et overtryk. Her bør udvises lidt forsigtighed, også selvom overtrykket er beskedent.
2. Der bør være en større bevidsthed på ledelsesniveau om, at store volumener af gas under et "ganske beskedent overtryk" indeholder en ikke uvæsentlig mængde energi (egentlig: *exergi*).
3. Vælg en sprængplade med det lavest mulige åbningstryk, ikke bare en "standardsprængplade" for ikke at blive omfattet af trykbeholderbekendtgørelsen.



Figur 2. Den fire tons tunge tank landede oven på en lille varebil. Det flyder med rockwool, isoleringskapper og gærfløde. Foto venligst stillet til rådighed af IW Michaelsen.

4. Systemet beskrevet i denne artikel var fuldt ud lovligt, og der findes helt sikkert tilsvarende systemer på andre virksomheder. Der var to komponenter til at sikre mod overtryk. En driftskomponent i form af en fjederbelastet ventil og en sikkerhedskomponent i form af en sprængplade. Den fjederbelastede ventil viste sig ikke at have kapacitet til et gasgenembrud fra mellembeholderen, hvilket selvfølgelig var en svaghed i designet. Sprængpladen havde rigelig kapacitet, men åbnede ikke, selvom trykket oversteg dens brudtryk. Årsagen var, at den var vendt forkert. Det er et så vigtigt læringspunkt, at det behandles særskilt i en artikel i næste nummer.

Epilog

Bryggeriet har velvilligt bidraget med oplysninger, men ønsker at være anonymt. Dette bør respekteres. Jeg vil gerne takke bryggeriet, indlægget havde ikke været muligt, hvis ikke informationerne var lagt åbent frem. Der sker en del uheld med væsentligt læringspotentialer i Danmark, men de kommunikeres sjældent til en større kreds. I mange tilfælde kommunikeres de slet ikke. Her er bryggeriet i særklasse.

Indlægget er skrevet som frivilligt arbejde og har ikke modtaget nogen støtte. Jeg udtaler mig som privatperson, ikke på vegne af mine arbejdsgivere eller andre.

E-mail:

Frank Huess Hedlund: fhhe@cowi.dk

Frank Hedlund er risikoekspert i Cowi og ekstern lektor på DTU i risk management.

Kilder

1. Huige N.J. Brewery By-Products and Effluents. In: Priest and Stewart (eds) Handbook of brewing. --2nd ed. Taylor & Francis, 2006.
2. Mortensen HP et al. (1981). Alternative fodermidler til svin - 6. gærfløde og fedt sammenlignet med byg og sojaskrå. Meddelelse nr. 393. Statens Husdyrbrugsforsøg.
3. Kurttala H., Isentropic Exergy and Pressure of the Shock Wave Caused by the Explosion of a Pressure Vessel, (PhD thesis), Lappeenranta University of Technology, Finland, 2003.
4. Hedlund FH, Selig RS, Kragh EK. Large Steel Tank Fails and Rockets to Height of 30 meters - Rupture Disc Installed Incorrectly, Safety and Health at Work (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.shaw.2015.11.004> (Open Access).

Note

1. <http://www.journalistenheder.dk/> kommer med den nyttige oplysning, at 30 m svarer til 0,86 Rundetårne stablet oven på hinanden.