Densitet målinger

v/ Rolf Skatvedt, Trainor Automation

Definisjoner

Oppdriften til et legeme er massen til det fortrengte volum, eksempelvis vil et legeme som nedsenkes i vann, fortrenge like mye væske som det selv fyller".

Siden denne oppdagelsen ble gjort av Arkimedes og stadfestet med ropet "Eureka" har man kunnet beregne densiteten eller egenvekten til gasser, væsker og faste stoffer ved å bestemme massen og volumet. Den grunnleggende definisjon på densitet er:

$$\text{Densitet} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volum}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad \text{, eller skrevet med bokstaver} = \frac{m}{V} \ .$$

Dette har vært av stor betydning i alle typer industri for å kunne kontrollere kvaliteten til et produkt, og densitet er her et uvurderlig hjelpemiddel. Vekt var i starten det analyseinstrument som var mest brukt, men i nyere tid er det etter hvert kommet nye metoder til.

Som det fremgår av formelen kan like store volumer av forskjellige stoffer variere betydelig i masse og vekt. Densitet, som også har betegnelsen egenvekt og tetthet, kan defineres i flere forskjellige enheter slik som: g/cm^3, lb/ft^3, lb/gal, kg/m^3. Da volum til både gasser og væsker vil forandre seg med temperaturen vil også densiteten forandre seg. Massen vil derimot være den samme. Når volumet blir større blir densiteten mindre. Dette gjelder helt generelt for alle stoff unntatt vann. Alle andre stoff får høyere og høyere densitet når de avkjøles og går over fra flytende til fast form. Vann derimot har sitt maksimum i densitet ved 4 °C (3,98 °C) så både varmere vann og is er lettere enn vann ved denne temperatur.

Relativ densitet (spesifikk vekt) er en tallstørrelse uten benevning, som fremkommer ved at man deler stoffets densitet ved en bestemt temperatur med densiteten til vann ved samme temperatur.

Denne måten blir i engelsk litteratur angitt som Specific Gravity eller SPG. Specific Gravity eller relativ densitet.

Densiteten til et substans/stoff er en av dens viktigste egenskaper. Denne verdien kan brukes til å skaffe informasjon om komposisjon, konsentrasjon, strømning og andre fysiske parametre.

Forklaring til termer brukt i oljeindustrien.

Densitet = egenvekt = tetthet

Relativ densitet = relativ egenvekt = relativ tetthet = relativ spesifikk vekt.

Densitet er masse dividert med volum, men siden temperatur og trykk påvirker volum og således densitet må også disse angis når densitet verdier skal presenteres.

Eksempler (vann ved atmosfære trykk)

Densitet til vann ved	4 °C	= 0,99997 kg/l
Densitet til vann ved	15.56 °C	= 0,99901 kg/l
Densitet til vann ved	25 °C	= 0,99704

Densitet tilsvarer det engelske begrepet density (i noen grad også betegnelsen gravity, men gravity er opprinnelig en definisjon hvor tyngdekraften var med.) Som vi skal se senere brukes det engelske begrepet "specific gravity".

Begrepet specific gravity tilsvarer vår relative densitet, og begge er dimensjonløse størrelser. Vi skal se hvorledes relativ densitet beregnes.

Relativ densitet for væsker er den dimensjonløse tallstørrelsen som fremkommer når densiteten til en væske ved en spesifisert temperatur, deles på densiteten til vann ved samme temperatur.

Relativ densitet for gasser er den dimensjonløse tallstørrelsen som fremkommer når densiteten til en gass ved en spesifisert temperatur og trykk, deles på densiteten til luft ved samme temperatur og trykk.

<u>Eksempel på relative densitet</u>

Densitet til olje ved 25 °C	= 0,845 kg/l
Densitet til vann ved 25 °C	= 0,99704 kg/l
Den relative densitet 25 °C/25 °C	= 0,8475
Densitet til olje ved 15,56°C	= 0,8526 kg/l
Densitet til vann ved 15.56 °C	= 0,99901 kg/l
Den relative densitet 15.56 °C/15.56 °C	= 0,8534

Grunnen til at det her er brukt 15,56 °C er fordi denne temperatur er nøyaktig lik 60 °F (Fahrenheit). Fahrenheit er en annen temperaturskala enn Celsiusskalaen. I både amerikansk og engelsk litteratur, og derfor også i norsk oljeindustri, er denne betegnelsen i bruk sammen med specific gravity.

Den relative densitet 15.56 °C/15.56 °C = 0,8534 er det samme som: specific gravity (SPG:) 60 °F/60 °F = 0,8534

Hvis en har en densitet måling ved eksempelvis 20 °C (0,845 kg/l) og skal angi denne som relativ densitet (specific gravity) ved 60 °F/60 °F, må en gjøre dette i to trinn:

Densiteten ved 20 °C må korrigeres ned til 15,56 °C. Dette er en ren volumkorreksjon som må tas fra tabeller da volumutvidelseskoeffisienten ikke er helt proporsjonal. I densitet området 0,8420 til 0,8514 er eksempelvis koeffisienten 0,00081 per grad Celsius. Korreksjonen blir da:

0,00081x(20-15,56) = 0,0036 som skal legges til (temperaturen går ned og densiteten øker).

Specific gravity 60 °F/60 °F = (0.845+0.0036)kg/l/0.99901 kg/l = 0,8494

Det finnes mange andre måter å angi densitet på, og spesielt innen forskjellige industrigrener er det mange definisjoner

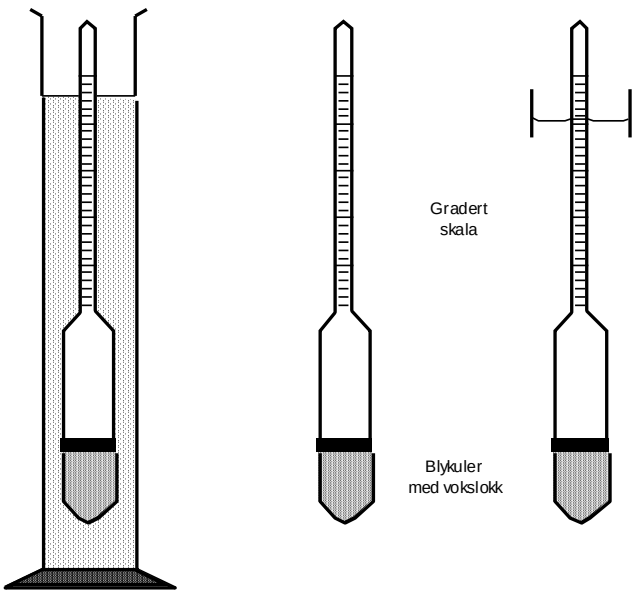
F.eks.

°API = grader API = 141.5/SPG 60 °F /60 °F - 131.5

°Baume (for væsker med densitet mindre enn vann)
= 140,0 / SPG 60 °F /60 °F - 130,0

°Baume (for væsker med densitet høyere enn vann)
= 145,0 / SPG 60 °F /60 °F - 145,0

Hydrometersom benyttes i laboratorier for måling av relativ densitet blir kalibrert etter disse enheter.



Figur1. Hydrometere

Temperatur og trykk påvirker densiteten

Temperatur, trykk og sammensetning (komposisjon) påvirker densiteten til væsker og gasser. Trykkvariasjoner har en ubetydelig effekt på densiteten til væsker som er stabile, eksempelvis vann, men må tas hensyn til når det gjelder hydrokarbon væsker og ikke minst for gasser hvor den har en dominerende effekt. Variasjoner i temperatur har en betydelig effekt på densiteten til både væsker og gasser. Det er derfor generelt nødvendig å kompensere for temperaturendringer dersom man krever nøyaktige målinger.

Densiteten til gass er avhengig av dens temperatur, trykk og sammensetning og kan beskrives av gjeldende gasslover. En ideell gass kan defineres som en gass hvis volumet gassmolekylene opptar er neglisjerbar i forhold til det totale systemvolum, og tiltrekningskreftene mellom molekylene er derfor ekstremt små under alle betingelser.

Den ideelle gasslovenblir definert som følgende:

$P\,V = n\,R\,T$, hvor

P er det absolutte trykket (Pascal
V er volumet (m^3)
n er antall mol av gassen (mol)
R er den universelle gasskonstanten (8,31441 $\left(\frac{J}{g\ mol\ K}\right)$
T er den absolutte temperaturen (Kelvin)

For virkelige gasser kan den ideelle gassloven kun anvendes ved lave trykk og relativt høye Kelvin temperaturer. En parameter som vanlig brukes for å beskrive avviket fra en gass i forholdet til idealistiske forhold er kompressibilitetsfaktoren (Z).

Den defineres som følger:

$$Z = \frac{P\,V}{n\,R\,T}$$

Densiteten til en gass er:

$$\rho = \frac{M\,n}{V}$$,hvor

M er den molekylære massen.

Setter vi inn denne i formel ovenfor får vi:

$$\rho = \frac{M\,P}{Z\,R\,T}$$

Densiteten til en gass kan kalkuleres fra ligningen beskrevet ovenfor. Man må selvfølgelig forsikre seg om at de enheter som benyttes i ligningen er riktige. Noen typiske verdier på R er listet nedenfor med dens respektive enhet.

R	Enhet
10,731	ft^3, lb/in^2, $lb\text{-}mol^{-1}$, og $°R^{-1}$
1545,3	ft^3, lb/in^2, $lb\text{-}mol^{-1}$, og $°R^{-1}$
0,7302	ft^3, atm, $lb\text{-}mol^{-1}$, og $°R^{-1}$
0,08205	liter, atm, $g\text{-}mol^{-1}$, og $°K^{-1}$
82,06	cm^3, atm, $g\text{-}mol^{-1}$, og $°K^{-1}$
62,36	liter, mmHg, $g\text{-}mol^{-1}$, og $°K^{-1}$
62,363	cm^3, mmHg, $g\text{-}mol^{-1}$, og $°K^{-1}$
1,9872	g-cal, $g\text{-}mol^{-1}$, og $°K^{-1}$
1,9872	BtU, $lb\text{-}mol^{-1}$, og $°K^{-1}$
8,314	Joule, $g\text{-}mol^{-1}$, og $°K^{-1}$

Densitet til noen gasser er gjengitt i tabell 1. Densiteten til væsker varierer mindre enn for gasser, og er også langt mindre avhengig av trykk og temperatur.

Densitet verdiene er oppgitt ved den såkalte NTS (normal tilstanden). Temperaturen er 0 °C og trykket er 1 atm.

Tabell 1

Gasstype	Densitet $\frac{kg}{m^3}$
Acetylen	1,1708
Ammoniakk	0,7708
Argon	1,7828
Helium	0,1769
Hydrogen	0,0898
Hydrogenklorid	1,6394
Klor	3,2204
Krypton	3,6431
Karbondioksid	1,9768
Karbonoksyd	1,2501
Metan	0,7167
Neon	0,8713
Nitrogen	1,2507
Nitrogenoksyd	1,3401
Oksygen	1,4289
Xenon	5,7168
Luft	1,2928

Omregning av gass densitet

Med utgangspunkt i den gassloven, kan man beregne densitet ved gitte betingelser dersom man kjenner tilstanden i et annet punkt.

Vi har:

$$\rho_l = \rho_r \frac{P_l}{P_r} \frac{T_r}{T_l} \frac{Z_r}{Z_l}$$,hvor

ρ_l = linje densitet til gassen man ønsker å måle $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$

ρ_r = densitet til gassen ved referansebetingelser $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$

P_l = linjetrykket til gassen (PaA)

P_r = referansetrykket til gassen (PaA)

T_l = linjetemperaturen til gassen (K)

T_r = referansetemperaturen til gassen (K)

Z_l = gassens kompressibilitet ved linjebetingelser

Z_r = gassens kompressibilitet ved referansebetingelser.

Kompressibilitetsfaktoren er forskjellig for forskjellige gasser og avhenger samtidig av trykk og temperatur betingelser. Ved lave trykk, P_l mindre enn 1000 kPa (10 bar), er Z_l tilnærmet lik 1.

Densitet i forbindelse med fiskale målinger

Densitet målinger er i hovedsak påkrevd av tre årsaker i fiskale mengemåling systemer, henholdsvis;

1. Masse strømningsmålinger
    - Massen til et fluid som strømmer gjennom en målestasjon kan beregnes fra målt volum og observert densitet ved linje betingelser
2. Væske volum korreksjoner
    - Algoritmene for termisk ekspansjonskoeffisienter gjeldene for et stort spenn av råolje og petroleums produkter har opp gjennom årene blitt publisert, og kan benyttes til å beregne volumkorreksjonsfaktorer med utgangspunkt i densitet ved standard betingelser og tilhørende temperatur. På tilsvarende måte kan væskens kompressibilitetsfaktor utledes fra standard densitet verdier.
3. Kvalitet bestemmelser
    - f.eks Wobbe index

Måling av densitet

Det finnes innenfor olje og gass industrien i dag et stort antall kommersielle målemetoder som er i stand til å måle densitet kontinuerlig og med god nøyaktighet, men før man går til det skritt å installere en kontinuerlig densitet måler i en

målestasjon bør dette rettferdiggjøres gjennom usikkerhetsanalyser og kost / nytte vurderinger.

De fleste on-line / kontinuerlige densitet målere som brukes i fiskale målesammenheng er basert på at et element (eksempelvis rør/sylinder) som settes til å svinge / vibrere, vil svinge med en egen / resonans frekvens som er gitt av densiteten til mediet som omgir sensor (svinge element).

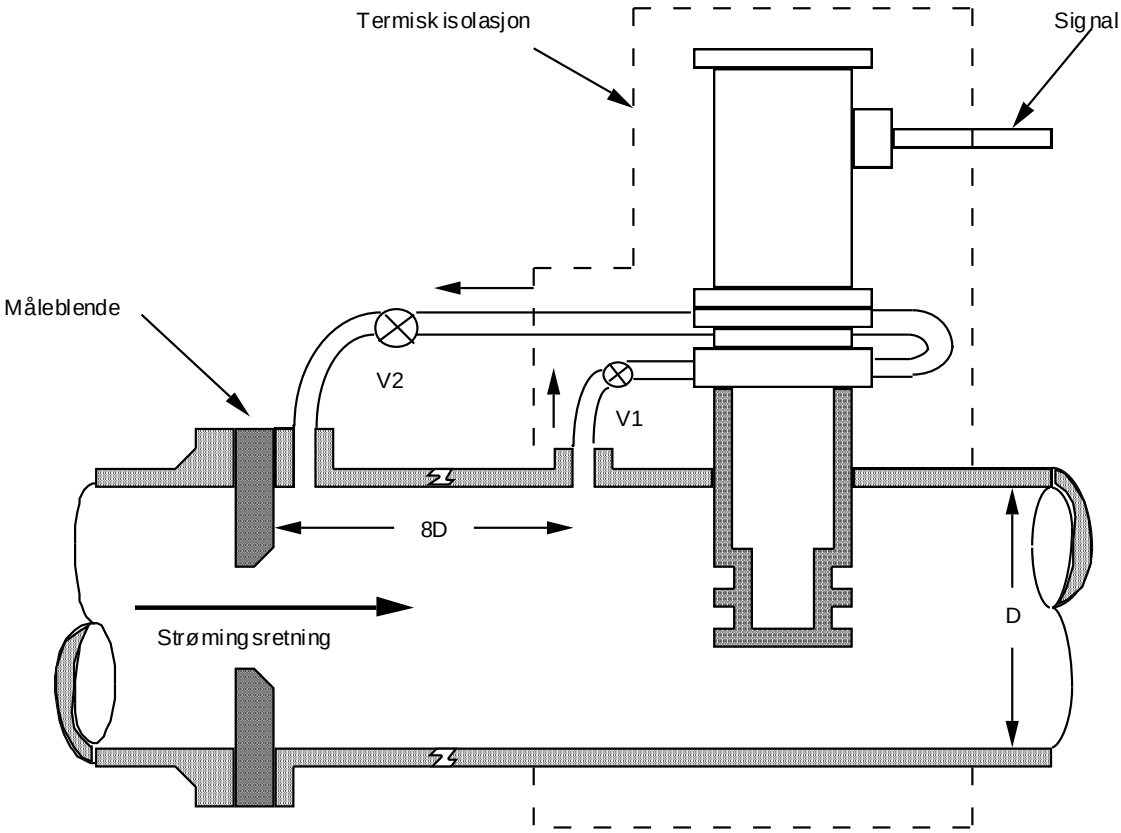
Sensor/ svinge elementet inngår i en oscillatorsløyfe som svinger med sin egen resonansfrekvens og som opprettholdes gjennom pådrag sendt til en elektromagnet / drivspole.

For å oppnå høyest mulig nøyaktighet i de tilfeller en online densitet måler er installert i et fiskalt mengdemålesystem bør påfølgende punkter gis spesiell oppmerksomhet.

- Operasjonsområde må være innenfor de grenser som er spesifisert av leverandør(er)
- Densitet sensor må isoleres fra støy som eventuelt følger rørsystemet den er en del av, ref spenninger, ubalanse, vibrasjoner, osv.
- Prøven som densitet sensor eksponeres for må være representativ for fluidet som går gjennom målestasjon og som måles volumetrisk et annet sted.
- Ideelt skal temperatur og trykk til fluidet som er omgir densitet sensor være lik de verdier som er der hvor den volumetriske målingen finner sted, hvis dette ikke lar seg oppnå må differansene registreres og nødvendige densitet korreksjoner gjennomføres.
- Temperatur likevekt mellom densitet sensor og punkt hvor den volumetriske målingen finner sted er viktig og instrument og tilhørende rørsystem skal isoleres for best mulig termisk stabilitet, spesielt viktig i gass sammenhenger.
- Densitet måler og tilhørende rørsystem må holde fluidet i den fase det er konstruert for å måle, dvs unngå fri gass dersom det er væske densitet som skal måles, og kondesert væske dersom gas densitet skal måles.
- Parallelle densitet målere må vurderes i de tilfeller det er essensielt med sikker og nøyaktig densitet angivelse.
- Strømningsraten gjennom sensor elementet må være justert slik at akseptabel tidsrespons knyttet til densitet forandringer oppnås, og også hindre at stoffer som følger med fluidet avsettes på sensor elementet.
- Densitet måleren må monteres slik at gass, væske, smuss, voks eller andre avsetninger ikke samles opp rundt sensor element eller i tilstøtende rør system.
- Dersom densitet sensor installeres i et bypass system (omløpssløyfe) bør det installeres en strømnings alarm, dvs en alarm som utløses dersom strømningsraten faller utenfor oppsatte grenseverdier.

Gass densitet målere

Som fluid er en gasstrømning ganske lik en væskestrømning, men det er dog en vesentlig forskjell med hensyn til kompressibiliteten. Siden en væske vanskelig lar seg komprimere, vil også densiteten kunne betraktes som konstant. Derimot for en gasstrømning, som lar seg meget lett komprimere, vil densiteten og derav massestrømningen være avhengig av spesielt trykkvariasjoner, men også av temperatur variasjoner. Benytter man seg av en måleblende vil man få et trykkfall når det foregår en strømning. Trykkfallet fører til at densiteten også reduseres. Siden man måler densitet litt lengre nede i rørsystemet, må man deretter beregne seg frem til densiteten i måleblenden.



Figur 2. Eksempel på installert gass densitet måler

Siden en økning av massen (grunnet økning i densitet) fører til en redusert frekvens på vibrasjonen, så vil densiteten til gassen representeres av en bestemt frekvens.

En forsterker, som er elektromagnetisk koblet til følerelementet, opprettholder betingelsene for vibrasjon. Forsterkeren gir også ut et signal som representerer densiteten til gassen.

Sammenhengen mellom densiteten til gassen og utgangsfrekvensen følger en veldefinert lov.

$\rho_i = K_0 + K_1 \tau + K_2 \tau^2$,hvor

ρ_i er den indikerte densiteten.
K_0, K_1 og K_2 er konstanter som finnes på kalibreringssertifikatet til densitet måleren.
τ er svingefrekvensens periodetid.

Det må korrigeres for eventuelle temperaturavvik, da konstantene K_0, K_1 og K_2 er bestemt ved 20 °C.

$\rho_a = \rho_i \left(1 + K_{18} \left(T - T_K \right) \right) + K_{19} \left(T - T_K \right)$,hvor

ρ_a er den aktuelle densiteten $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$
K_{18} og K_{19} er konstanter som finnes på kalibreringssertifikatet.
T er temperaturen målt i densitet måleren (°C).
T_K er temperaturen når man foretok kalibrering av densitet målren (f.eks. T_K = 20 °C).

Siden konstantene K_0 ,K_1 og K_2 er bestemt for gassen argon eller nitrogen, må man foreta en korreksjon når man måler på en annen gass..

$$\rho_u = \rho_a \left(1 + \frac{K_3}{\rho_a + K_4} \left(0{,}00282 - \frac{G}{T - 273\ °C} \right) \right)$$,hvor

ρ_u er densiteten til gassen som måles.
K_3 og K_4 er konstanter som finnes på kalibreringssertifikatet.
G er forholdet mellom gassens relative densitet og isentropiske eksponent.

Den maksimale unøyaktigheten til denne type målere hevdes nå å være mindre enn 0,1 % av avlest verdi.

Ønsker man en sjekk av densitet måleren, kan dette utføres på forskjellige måter, 3 metoder blir i korthet beskrevet nedenfor.

1. Ved å ha luft i densitet meterkammeret ved atmosfæriske betingelser, kan man se om frekvensutgangssignalet representerer densiteten til atmosfærisk luft. Man ventilerer ut gassen inne i densitet meterkammeret slik at gassen får et trykk som er tilnærmet lik det atmosfæriske trykket. Typisk nøyaktighet for denne metoden er ± 0,1 kg/m^3. Selv om de atmosfæriske betingelsene (temperatur og trykk) er nokså ensartede, vil selv små endringer i lufttrykket og temperaturen spille inn på densiteten til den atmosfæriske luften. Som eksempel kan nevnes at densiteten til luft ved P=1013,25 mbarA og T=10 °C er lik ρ=1,244 kg/m^3. Dersom P=973,25 mbarA og T=20 °C, er ρ=1,152 kg/m^3 (altså 8 % avvik fra tilstand 1).
2. Ved å ha et vakuum som er lavere enn 1 mmHgA i densitet meterkammeret, kan man ha en typisk måle nøyaktighet som er på ± 0,005 kg/m^3, og dette er således den mest nøyaktige testen av de som her er beskrevet.

3. Trykk/temperatur av en kjent gass. Man kan foreta en kalibreringssjekk ved å benytte seg av trykk/ temperatur/tetthet sammenhengen for en kjent gass. Her er det viktig at testgassen får tilstrekkelig med stabilitetstid. Måle nøyaktigheten vil typisk være 1 til 2 % av avlest verdi.

Feilsøking

I de fleste tilfeller hvor densitet måler ikke virker tilfredsstillende vil årsaken være tilstedeværelse av skitt, smuss eller kondensat på følerelementet. Korrosjon på følerelementet kan også være årsak til feilavlesning av densitet.

Feil montasje av sylinderen etter en full kalibrering kan også være en årsak.

Feil innlagte kalibreringskoeffisienter i forhold til montert densitet måler kan være en årsak til feil.

Feil kan også oppstå i forsterkerkretsen. Feil kan oppstå i detektor spolen eller i pådragsspolen (sjekk oppgitt motstand i ohm)

Tilslutt kan man sjekke at tilkoblingsrørsystem/filtre ikke er tette.

Væske densitet målere

En densitet måler for væske som er basert på måleprinsippet "vibrerende element" virker i prinsippet på samme måte som den beskrevet for gass, men siden væske er annerledes enn gass vil selvfølgelig mekaniske størrelser/dimensjoner, kalibreringskoeffisienter, etc være annerledes. Sjekk av væske densitet målere gjøres hovedsakelig gjennom sammenligning av målt verdi mot tilsvarende resultat fra laboratorium.

Væske densitet verdier i forhold til sedimenter og vann

Gjennom kjennskap til innhold av sedimenter (S) og vann (v) volum andel) kan det gjøres følgende beregninger.

Densitet tørr olje:

$$\rho_c = \frac{\rho_{m-}\rho_v \times SV}{1 - Sv}$$

Tørr olje masse:

$$Q_c = Q_m \left(1 - \frac{\rho_v \times SV}{\rho_m}\right)$$

Masse S og V forholdet er

$$SV(masse) = SV \times \frac{\rho_v}{\rho_m}$$

Hvor
SV = sediment og vann (volum forhold)
ρ_v= densitet til vann, f.eks 1,030 g/ml (typisk for saltvann)
ρ_m= densitet til ”våt” eller ”mikset” olje
Q_m = massen til ”våt” eller ”mikset” olje

NB! S og V verdier leveres normalt ut fra lab i prosent.

Dersom densitet angivelsen angis i masse og det skal gjøres om til ”vekt i luft” som er vanlig handelsenhet for olje må følgende gjøres:

Vekt i luft = Volum ved t°C x (densitet ved t°C – 0,0011 g/ml)