

NEM ÖLÇÜMLERİNDE KULLANILAN CİHAZLAR VE KALİBRASYONLARI

Dr. M. Turhan Çoban
Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü
turhan.coban@ege.edu.tr

özet

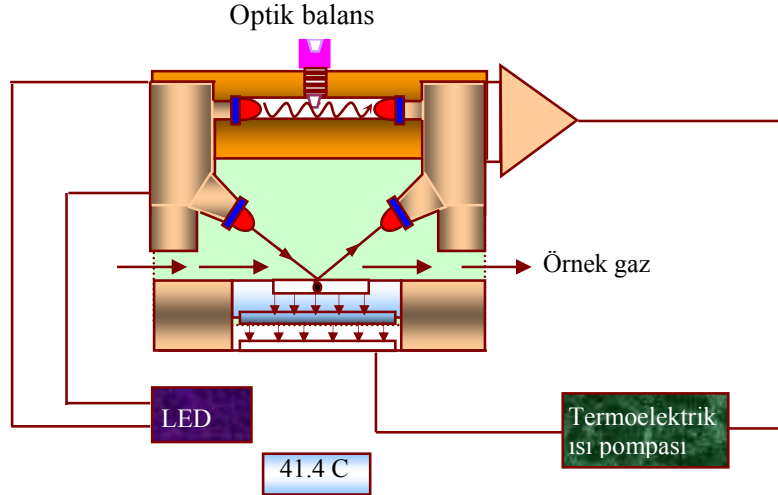
Nem ölçerler soğutma soğutma ve iklimlendirme alanında yoğun kullanılan ekipmanlardır. Bu yazıda nem ölçümünde kullanılan ekipmanlar ve bunların kalibrasyonlarının temel kuralları tanıtılmaktadır. Nem ölçerler olarak çiy noktası ölçerler, hygrometreler, mekanik nem ölçerler, ıslak kuru hazneli ölçerler, seramik oksit ölçerler gibi sistemler incelenmiştir. Kalibrasyon nasıl yapılır ve kalibrasyon belirsizliği kavramları anlatılmıştır.

1. Nem Ölçerler

1. Çiy Noktası Ölçer (Dew point meter)
2. Empedans, Direnç Sensörlü Nem Ölçer (Hygrometer)
3. Mekanik Nem Ölçer
4. Islak/Kuru Hazneli Nem Ölçer (Wet/Dry Bulb Aspirated Hygrometer veya Psychrometer)
5. Alüminyum/Seramik Oksit Sensörler

1.1 Çiy Noktası Ölçer

Çiy noktası ölçer “yoğunlaşma aynasında optiksel yöntemle detekte etme” (optically detected chilled mirror) tekniğini kullanarak ölçümleri gerçekleştirir.



Şekil 1. Yoğunlaşma Aynası Çiy Noktası Ölçerlerin Genel Çalışma Prensibi

Yoğunlaşma aynasında optiksel yöntemle detekte etme tekniğini kullanarak yapılan ölçümlerde herhangi bir gazın çiy veya kırağı noktası sıcaklığı ölçülür. Işık, cilalanmış metal yüzey (ayna) üzerine düşer. Bu yüzeyin sıcaklığı, termoelektrik ısı pompası olarak bilinen Peltier tarafından kontrol edilir. Işığa hassas bir alıcı ile yansıyan ışığın yoğunluğu ölçülür. Ayna yüzeyi temiz ve kuru olduğunda yansıyan ışığın yoğunluğu maksimumdur. Tam tersine yüzey soğutularak suyun

yoğunlaşması sağlandığında ise ışık dağılır ve daha az ışık yansır. Böylece ışık ve sinyal yoğunluğu da azalır. Bu alınan ışık sinyali, geri besleme olarak kullanılarak, yoğunlaşan tabakanın kalınlığı sabit oluncaya kadar ayna yüzeyi soğutulur. Sabit kalınlıktaki yoğunlaşmış tabaka, aynayı çevreleyen gaz ile dengededir. Bu denge durumunda, gazın çiy veya kırağı noktası sıcaklığı, ayna sıcaklığı ölçülerek belirlenir. Eğer yoğunlaşma sıvı haldeyse, ölçülen ayna sıcaklığı çiy noktası sıcaklığıdır. Eğer yoğunlaşma buz veya kırağı gibi katı haldeyse, ölçülen ayna sıcaklığı kırağı noktası sıcaklığıdır. Belirsizlikleri 0.2 °C DP ile 1.0 °C DP arasındadır. [2]

1.2 Empedans, Direnç Sensörlü Nem Ölçer (Hygrometer)

Bu tip sensörler su moleküllerini emerek bunu elektriksel değişim olarak algılayan su tutucu (hygroscopic) materyallerden yapılmaktadır. Bu tür nem ölçüm sensörleri elektriksel empedans, direnç veya her ikisini de kullanan yöntemlerle dizayn edilirler. Empedans sensörler bağıl neme çiy noktasından daha iyi yanıt verirler. Genelde bu tip sensörler %100 bağıl nem değerinde zarar görmezler ama bunun sonucunda kalibrasyon sonuçları değişebilir. Direnç sensörler de bağıl neme çiy noktasından daha iyi yanıt verirler. Yüksek bağıl nem değerlerinde doğruluğu iyidir. Ancak yoğunlaşmayı tolere etmezler ve zarar görebilirler. Bu yüzden yoğunlaşmayı önlemek amacıyla ek donanımları vardır. Belirsizlikleri % 2 RH ile % 3 RH aralığındadır.

1.3 Mekanik Nem Ölçer

Mekanik nem ölçerler, nem ile genleşen veya büzüşen organik materyalleri kullanarak ölçüm yaparlar. Algılayıcı eleman insan saçı, tekstil ürünü veya plastik olabilir. Uzunluktaki değişimin genliği artırılarak grafik üzerindeki kaleme iletilir. Bu tip cihazlar ucuzdur, elektriksel güce ve bataryaya gerek duymaz ve sürekli kayıt yapıldığında kayıtları saklama kolaylığı vardır. Fakat nem değişimini yavaş algılar, histeresis gözlenir ve taşınma sırasında kolayca bozulabilirler. Bu nedenlerden dolayı kalibrasyon ve izlenebilirlik için uygun değildir. Belirsizlikleri % 5 RH ile % 10 RH aralığındadır.

1.4 Alüminyum/Seramik Oksit Sensörler

Sensörün aktif elementi, alüminyum oksit, diğer metallerin oksitleri veya silikon bazlıdır. Bu tip sensörler su buharının kısmi basıncını algırlar. Başka bir deyişle sensör empedans değeri, su buhar basıncı değeri ile ilişkilidir. Bu sensörlerin genelde yoğunlaşma toleransı iyidir ve geniş bir ölçüm aralığına sahiptirler. Fakat çok düşük mutlak nem ölçümlerinde dengeye gelmesi yavaştır ve kaymaya eğilimlidir. Yüksek sıcaklık ve yüksek nem ölçümlerinde kullanıldıkları takdirde ise kalibrasyon değerlerinde kayma meydana gelebilir. Ayrıca aşındırıcı kimyasallardan zarar görebilirler. Bu tip cihazlar mutlak nem ölçümlerinde kullanılır. Ayrıca düşük nem değerlerinin ölçülmesinde, kuru gazların kontrol ve izlenmesinde kullanılırlar. Çiy noktası ölçerlerin belirsizliği 2 °C, düşük çiy noktası değerlerinde ise en iyi 5 °C dir. [3]

1.5 Islak/Kuru Hazneli Nem Ölçer (Wet/Dry Bulb Aspirated Hygrometer / Psychrometer)

Islak-kuru hazneli nem ölçerler, iki eş termometre ve hava akımını sağlayan bir pervaneden meydana gelir. Havanın kuru-hazne sıcaklığı hava ile doğrudan temas halindeki bir termometre ile ölçülür. Bu termometre dışardan gelebilecek radyasyon (güneş ışığı, lamba v.b.) ve nemden etkilenmeyecek şekilde korunmuştur. Termometrenin diğeri ise sensörü (cıva haznesi), devamlı ıslaklığı sağlayacak bir fitil (pamuklu kumaş) ile çevrelenmiştir. Tepe kısmında bulunan pervane

çalıştırılarak ıslak termometre soğutulur. Islak-hazne sıcaklığı, pervane ile soğutulma sonucunda elde edilen sıcaklık değeridir. Islak termometrenin okuduğu sıcaklık ile ıslatılmamış, normal ortam sıcaklığını okuyan termometre sıcaklığı kullanılarak bağıl nem değeri elde edilir.

Ölçümler, suyun saflığına, fitilin temizliğine, pervane hızına, radyasyon etkilerine, sıcaklık sensörünün doğruluğuna ve gazın yoğunluk, akışkanlık ve ısı iletkenliğine bağlıdır.

Pratik kullanımda doğru sonuç elde etmek için birçok uyarıya (bakımının yapılması, korunması hakkında) uyulmalıdır. Bu cihazlar sıcaklık ölçümünde oldukça kısıtlı çalışma aralığına (0 °C...+90 °C) sahip olmasına rağmen pratik kullanım için bağıl nem aralığı yeterlidir. Ayrıca bu cihazlar yüksek sıcaklıklara ve yoğunlaşmaya dayanıklıdır. Orta düzeyde doğruluğa sahiptir. Müşterilerin bu cihazları kullanarak nem ölçen cihazlarını kalibre etmelerinin nedeni düşük maliyetli olmasıdır.

Belirsizliği % 2 RH ile % 5 RH aralığında değişim göstermektedir.

1.5.1 Psychrometric Grafik Okuma

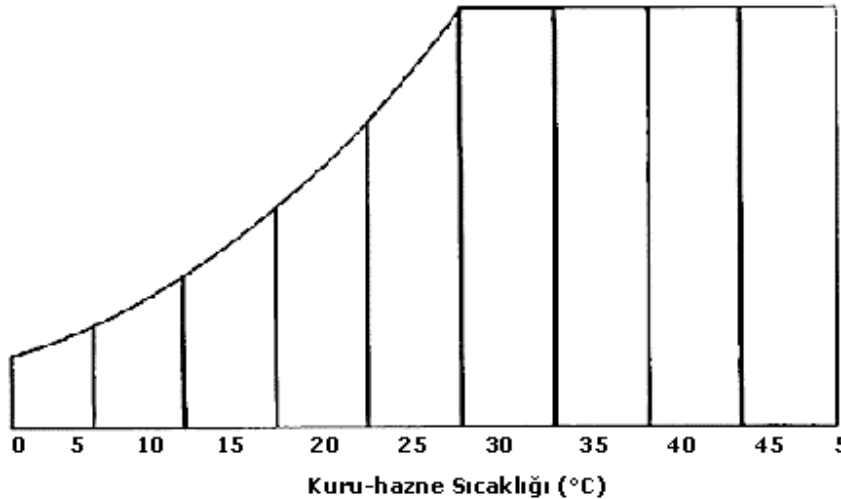
Psychrometric Grafik nemli havanın bir çok özelliğini bir arada gösterir. Bu grafikte kullanılan iki değer biliniyorsa, grafikteki diğer birimlere dönüşüm kolayca yapılır. Bu grafikte bulunan parametreler aşağıda verilmiştir.

- Kuru-hazne sıcaklığı
- Islak-hazne sıcaklığı
- Çiy noktası sıcaklığı
- Bağıl Nem
- Islaklık oranı
- Özgül entalpi
- Özgül hacim

Örnek olarak kuru-hazne sıcaklığı 30 °C ve ıslak-hazne sıcaklığı 27 °C okunuyorsa bağıl nem değeri % 80, nem oranı 21.5 gr/kg ve çiy noktası sıcaklığı ise yaklaşık 26 °C DP okunur.

Kuru-hazne Sıcaklığı (Dry-bulb Temperature)

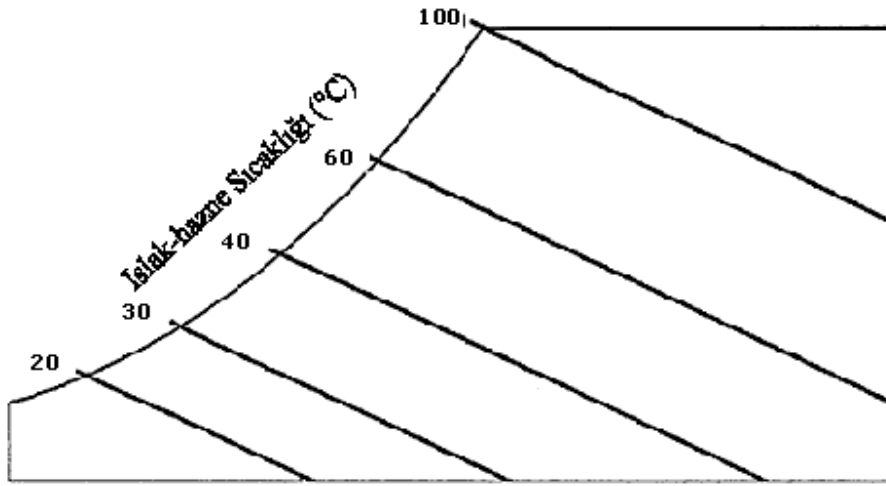
Grafikte kuru-hazne sıcaklığı grafiğin tabanında verilmiştir. Dikey çizgiler kuru-hazne sıcaklığını belirtir.



Grafik 1. Kuru-hazne sıcaklığı çizgileri.

Islak-hazne Sıcaklığı (Wet-bulb Temperature)

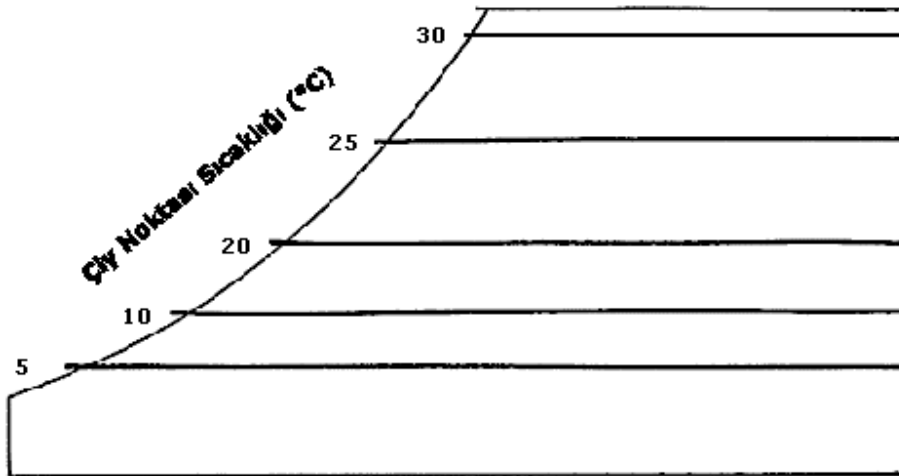
Grafikteki eğilim çizgileri ıslak-hazne sıcaklığını gösterir.



Grafik 2. Islak-hazne sıcaklığı çizgileri.

Çiy Noktası (Doyma) Sıcaklığı

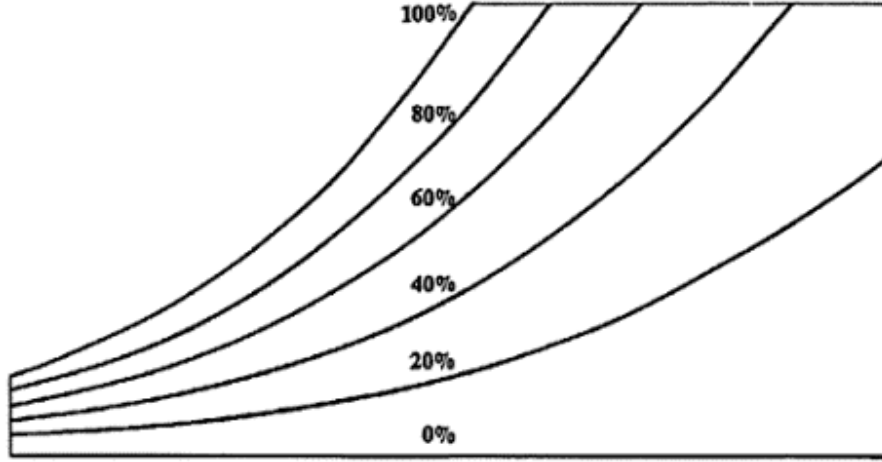
Grafikteki yatay çizgiler çiy noktası sıcaklığını gösterir.



Grafik 3. Çiy noktası sıcaklığı çizgileri.

Bağıl Nem (Relative Humidity)

Grafikteki eğri çizgiler bağıl nem değerini gösterir. % 100 bağıl nem değerini gösteren çizgi aynı zamanda çiy noktası sıcaklığı ölçөгüdür. % 0 bağıl nem değerini gösteren çizgi ise aynı zamanda kuru-hazne sıcaklığı ölçөгüdür.



Grafik 4. Bağıl Nem çizgileri

Psychrometric grafikte aşağıda verilen parametreler de grafikten bulunabilir.

Özgöl Nem veya Havanın Nem Oranı (Specific Humidity or Moisture Content of Air)

Özgöl nem veya havanın nem oranı, belli bir hacimdeki nemli havada bulunan, suyun kütlesinin kuru havanın kütlesine oranıdır. Grafikte sol taraftaki y-ekseni ile belirtilmiştir.

Özgöl Entalpi (Specific Enthalpy)

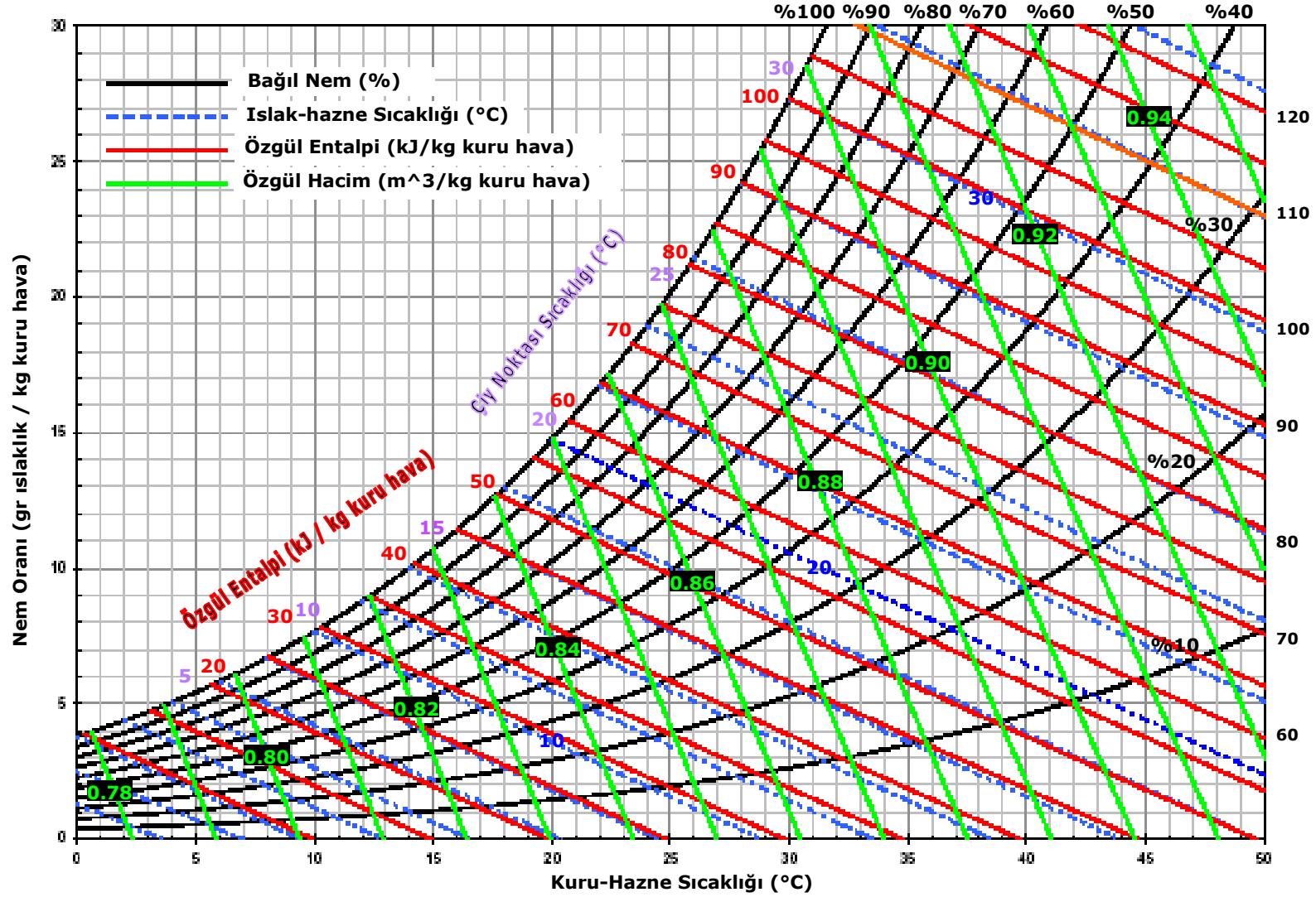
Entalpi : Bir sistemin Entalpi değeri, sistemin kütlesi ile sistemin özgöl entalpi değerinin çarpımı olarak tanımlanır. $H=m h$

Özgöl entalpi ise akışkanın bir özelliğidir ve $h=u+P v$ formülü ile tanımlanır. Burada u = Özgöl İç Enerji, P = Basınç, v = Özgöl Hacim'dir. Özgöl entalpi [enerji / kütle] olarak ifade edilir ve SI birimi J/kg dır. Grafikte % 100 bağıl nem eğrisindeki değerler ile ifade edilir.

Özgöl Hacim (Specific Volume)

Bir sistemin özgöl hacmi, sistemin birim hacmi tarafından kaplanan hacim olarak tanımlanır. Özgöl hacim ile yoğunluk arasındaki ilişki $v = 1/\rho$ formülü ile verilir. Özgöl hacim SI birimi m^3/kg dır. Grafikte eğilim çizgileri ile ifade edilir ve değerler çizgilerin üzerindedir.

Psychrometric Grafik
Basınç 1.01325 bar



2. Nem Dönüşüm Örnekleri

Örnek 1: Atmosfer basıncında, 20 °C sıcaklığında doyma buhar basıncını hesaplayınız.

$$P = 1013.25 \text{ mbar} = 101.325 \text{ kPa}$$

$$e_w (T=20 \text{ °C}) = (1.0007 + 0.00000346 * 1000) * 6.1121 * \exp \left(\frac{(17.502 * 20)}{(240.97 + 20)} \right) \\ = 23.4701 \text{ hPa} = 23.4701 \text{ mbar}$$

Tablodan da hesaplanabilir.

Örnek 2: RH den DP ye dönüşüm

21 °C de % 45 bağıl nem değerlerine karşılık gelen çiy noktası sıcaklığını hesaplayınız.

$$\%RH = \frac{e_w}{e_{ws}} \cdot 100 \quad ;$$

Denklemini kullanarak e_{ws} değeri tablolardan veya 7 numaralı denklemden hesaplanabilir.

Tablolardan alırsak $e_w (T_s=21 \text{ °C}) = 24.861 \text{ mbar} = 2.4861 \text{ kPa}$ ve bağıl nem % 45 için denklemden yerlerine koyarsak

$$45 = \left(\frac{e_w}{24.861 \text{ mbar}} \right) * 100$$

$$e_w = (45 * 24.861) / 100$$

$$e_w = 11.187 \text{ mbar}$$

Tabloyu kullanarak bu değere karşılık gelen T değerinin yaklaşık 8.6 °C DP olduğu görülür.

Örnek 3: DP den RH ye dönüşüm

30 °C ortam sıcaklığında 25 °C DP değeri hangi bağıl nem değerine karşılık gelir ?

$$25 \text{ °C DP değerine karşılık gelen } e_w(T) = 31.671 \text{ mbar} = 3.1671 \text{ kPa}$$

$$30 \text{ °C ortam sıcaklığına karşılık gelen } e_w(T_s) = 42.430 \text{ mbar} = 4.2430 \text{ kPa}$$

$$\%RH = \frac{e_w}{e_{ws}} \cdot 100 \quad \text{denklemini kullanırsak;}$$

$$RH = (31.671 / 42.430) * 100 = \% 74.64 \text{ RH elde edilir.}$$

Örnek 4: RH den PPMv ye dönüşüm

21 °C de % 45 bağıl nem değerine karşılık gelen PPMv değerini hesaplayınız.

$$PPM_v = 10^6 \times e / (P - e) \quad 10b \text{ denklemini kullanarak hesaplayabiliriz.}$$

İlk önce Buhar basıncı e değerini hesaplayalım. Örnek 2 de bu değeri hesaplamıştık.
 $e_w(T_s) = 11.187 \text{ mbar}$

$$\text{PPM}_v = 10^6 * (11.187 / (1013.25 - 11.187))$$

$$\text{PPM}_v = 11163.97 = 1,1164 \times 10^{-2} \text{ ppm}$$

Örnek 5: PPM_v den DP ye dönüşüm

7532.56 PPM_v değerine karşılık gelen çiy noktası sıcaklık değerini hesaplayınız.

$\text{PPM}_v = 10^6 * e / (P - e)$ 10b denklemini kullanarak hesaplayabiliriz.

$$7532.56 = 10^6 * (e / (1013.25 - e))$$

$$e = [(1013.25) / ((10^6 / 7532.56) + 1)]$$
$$e = 7.5753 \text{ mbar}$$

Bu değere karşılık gelen çiy noktası (DP) sıcaklığını ise tablodan bulabiliriz. $T_s = 3.0 \text{ °C DP}$

Örnek 6: PPM_v den RH ye dönüşüm

7532.56 ppm_v değerine karşılık gelen bağıl nem değerini hesaplayınız. Ortam sıcaklığı 20 °C dir.

$$\%RH = \frac{e_w}{e_{ws}} \cdot 100 \quad \text{denklemini kullanarak hesaplanır.}$$

7532.56 ppm_v değerine karşılık gelen $e_w(T)$ değeri 5. örnekte hesaplanmıştır.

$$e_w(T) = 7.5753 \text{ mbar}$$

$$e_w(T=20\text{°C}) = 23.373 \text{ mbar değeri tablodan alınır.}$$

$$\% RH = (7.5753 / 23.373) * 100$$

$$\% RH = \% 32.4$$

Örnek 7: DP den PPM_v ye dönüşüm

Çiy noktası sıcaklığı DP = 2.0 °C ise buna karşılık gelen PPM_v değerini hesaplayınız.

$\text{PPM}_v = 10^6 * e / (P - e)$ 10b denklemini kullanarak hesaplayabiliriz.

Tablodan $e_w(T=2.0\text{°C}) = 7.0547 \text{ mbar değeri alınır.}$

$$\text{PPM}_v = 10^6 * (7.0547 / (1013.25 - 7.0547))$$

$$\text{PPM}_v = 7011.26 \text{ ppm}$$

3. Endüstriyel Nem Laboratuvarı ve Kalibrasyonlar

Nem kalibrasyonlarının yapılabilmesi için, ilk şart ulusal enstitüye izlenebilir bir nem kaynağının olmasıdır. Nem kaynağının ulusal enstitüye izlenebilirliği iki şekilde sağlanabilir.

1. Nem kaynağı karşılaştırma yöntemiyle, ulusal enstitüye izlenebilir olarak kalibre ettirilir.
2. Referans nem ölçer (bu durumda çiy noktası ölçer olması, kararlılık ve tekrarlanabilirlik açısından tercih edilmelidir) ulusal enstitüye izlenebilir olarak kalibre edilir ve referans nem ölçer kullanılarak nem kabini kalibre edilir.

Aslında ikinci yöntemin kullanılarak kalibrasyonların yapılması bir takım karakterizasyonları gerektirir ve istenirse farklı bir eğitimin konusudur.

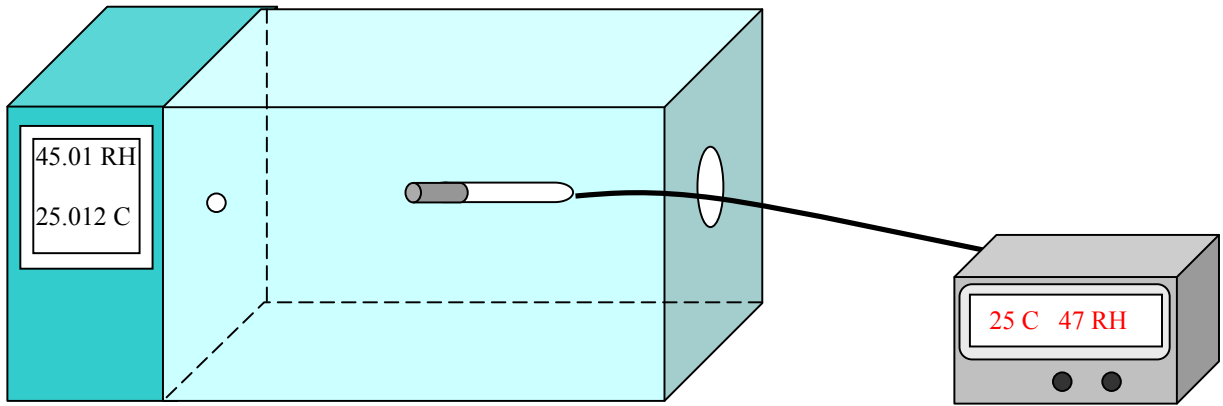
Çok daha yüksek belirsizliklerle kullanıcının kendi nem ölçerini kalibre edebilmesini sağlayan bir diğer yöntem ise tuz eriyiklerinin kullanılmasıdır.

Doymuş tuz eriyikleri istenilen oranlarda hazırlandığında belirli nem değeri elde edilir. Nem ölçerler, kapalı bir odacık içinde bu eriyiklerin oluşturduğu ortama yerleştirilerek kalibre edilirler. Standart doymuş tuz eriyikleri ticari olarak bulunabilmektedir. Fakat zaman içerisinde değerlerinde kaymalar gözlenebilir veya kullanıcı kendisi hazırlamış ise standart tam olarak hazırlanamayabilir. Bu koşullarda eriyiğin ulusal enstitüye izlenebilir bir nem ölçer kullanılarak doğrulanması uygundur. Ayrıca ortam sıcaklığındaki 0.1 °C değişim, bağıl nem oranı değerinde % 0.5 değişime neden olabilmektedir. Bu nedenle laboratuvarda 0.1 °C sıcaklık kararlılığı sağlanamamış ise bu yöntemle belirsizliğin % 2.5 RH değerine ulaşması beklenmelidir. Bu yöntem yukarıda belirtilen nedenlerle kalibrasyon yapan laboratuvarlar için uygun değildir.

4. Kalibrasyon Aşamaları

Nem Kabininde nem ölçer (hygrometer) kalibrasyonu

1. Nem ölçer nem kabine yerleştirilir.
2. Nem kaynağı istenilen bağıl nem değerine ayarlanır.
3. Nem kaynağının istenilen belirsizlikle kararlı hale gelmesi beklenir.
4. Test nem ölçerin kararlı hale gelmesi beklenir.
5. Bu değerde 1-10 dakika aralıklarla en az 10 veri alınır.



Şekil 2. Nem ölçer kalibrasyonu

5. Nem kabini ve tuz solüsyonlarında yapılan kalibrasyonlar için belirsizlik :

A - tipi belirsizlik (u_A):

- Belli bir referans nem değerinde test cihazının belirli bir zaman içinde okuduğu değerlerin standart sapmasıdır.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

s : Standart sapma
n : Ölçüm sayısı
 x_i : i . ölçüm değeri
 \bar{x} : ölçümlerin ortalaması

(27)

B-tipi belirsizlik (nem kabini ve yapılan kalibrasyonlar için)

- Nem kaynağı ya da referans cihazın bağıl nem kalibrasyon belirsizliği (u_{B1})
- Nem kabini sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan bağıl nem belirsizliği (u_{B2})
- Nem kabini sıcaklık dağılımından kaynaklanan bağıl nem belirsizliği (u_{B3})
- Test nem cihazının duyarlılığı/çözünürlüğünden gelen belirsizlik (u_{B4})
- Kalibrasyona özgü diğer belirsizlik bileşenleri (u_{B5})

B-tipi belirsizlik (tuz solüsyonlarında yapılan kalibrasyonlar için)

- Referans nem değerinin (eriyik için verilen belirsizlik değeri) belirsizliği (u_{B1})
- Sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan bağıl nem belirsizliği (u_{B2})
- Test nem cihazının tekrarlanabilirliği (u_{B3})
- Kalibrasyona özgü diğer belirsizlik bileşenleri (u_{B4})

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2} \quad (28)$$

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (29)$$

Genişletilmiş belirsizlik, U; A ve B tipi belirsizlik bileşenlerinin karelerinin toplamının kareködür. Ölçümün, % 95 güvenilirlik düzeyinde ve kapsam faktörü k=2 için genişletilmiş belirsizlik değeri, aşağıdaki formül kullanılarak elde edilir.

$$U = k \cdot u_c \quad (30)$$

6. Referanslar

[1] Operation and Maintenance Manual, Benchtop Two Pressure Humidity Generator Series 2500, Thunder Scientific.

[2] www.michell.co.uk “ Principles of Chilled Mirror ”

[3] “ A Guide to the Measurement of Humidity ”, The Institute of Measurement and Control, NPL (UK), 1996.