

KURUTMA TEKNİĞİ

PROF. DR. AHMET ÇOLAK

PROF. DR. MUSA AYIK

11. KURUTMA TEKNİĞİ

Ürünün içerdiği nemin, belirli bir sınır değere dek, buharlaştırılarak üründen akmasına, kurutma denir. Kurutma sayesinde ürün içerisinde mikroorganizma, ferment ya da enzim faaliyetleri durdurulur. Böylece, ürünün bozulmadan uzun süre muhafaza edilebilmesi sağlanır. Kurutularak muhafaza edilen ürünler daha az yer işgal ederler. Öte yandan kurutulmuş ürünlerin tüketim süresi artırıldığı için, fiyatta kararlılık sağlanabilir. Ne var ki, kurutulan ürünlerin depolanmasında nem ve ışığın zararlı etkisinden korunması kaçınılmazdır.

11.1. Kurutma Havasının özellikleri

Kurutma işinde, özellikle de ısı taşınımı ile gerçekleştirilen kurutma yöntemlerinde, yüksek sıcaklıktaki kuru havadan yararlanılır. Ayrıca, düşük sıcaklıktaki kuru hava ile ek kurutma yapılabildiği gibi, kurutulmuş ürünün soğutulması da sağlanır.

Kurutma havasının sıcaklığı yanında içerdiği nem miktarı da önemlidir. Öyle ki, nem içeriğinin fazla olması, kurutma hızını ve dolayısıyla kurutma kalitesini olumsuz yönde etkiler.

Belirli hacimdeki havanın, sıcaklığına bağlı olarak içereceği nem miktarı sınırlıdır. Maksimum nem içeren havaya doymuş hava denir. Buna göre, hava, bulunduğu sıcaklığa göre taşıyabileceği maksimum nem içeriğine dek çevreden nem alabilir. Doymuşluk halinden sonra, havaya verilecek nem, sis halinde yoğunlaşmaya başlar.

Kurutma uygulamalarında başarı sağlamak için hava ve özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir.

11.1.1. Havanın Nem İçeriği

Nemli hava, kuru hava ile hava içinde buhar halinde bulunan suyun karışımıdır. Hava içindeki mutlak nem oranı x (kg /kg) ise;

$$x = \frac{m_B}{m_H}$$

Burada;

m_B : Hava içinde buhar halindeki su miktarı, kg ve

m_H : Havanın ağırlığıdır, kg.

Hava ve suyun toplam karışımının;

$m_H + m_B = m_H (1 + x)$ yazılabilir.

Genel gaz yasasına göre;

$$m_H = \frac{P_H \cdot M_H}{R} \cdot \frac{V}{T} \text{ ve } m_B = \frac{P'_B \cdot M_B}{R} \cdot \frac{V}{T} \text{ olup}$$

$$x = \frac{m_B}{m_H} = \frac{P'_B \cdot M_B}{P_H \cdot M_H} \text{ bulunur.}$$

Eşitlikte, önce verilenler dışında;

P'_B : Su buharının kısmi basıncı, kg /cm^2

P_H : Havanın kısmi basıncı, kg /cm^2 ,

M_B : Su buharının molekül ağırlığı, 18,016 kg/mol ve

M_H : Havanın molekül ağırlığıdır, 28,96 kg/mol .

Psikrometrik yöntemle hava m minin ölçülmesinde, yaş ve kuru termometrelerden yararlanır. Havanın nem içeriğine göre yaş ve kuru termometrelerde okunan sıcaklık farkı değişir. Okunan sıcaklık farkına bağlı olarak bağıl nem oram saptanır. Bağıl nem oram $\phi = P'_B / P_B$ olup, P'_B subuharının kısmi buhar basıncı şu eşitlikten bulunur:

$$P'_B - P_y - 0,50 (t_k - t_y)$$

Eşitliklerde;

P_y : Yaş termometre sıcaklığı için doyma basıncı,

T_k : Kuru termometre sıcaklığı,

t_y : Yaş termometre sıcaklığı ve

P_B : Kuru termometre sıcaklığı için doyma basıncıdır.

Öte yandan, toplam basınç; $P = P'_B + P_H$ alınarak;

$$x = \frac{M_B}{M_H} \cdot \frac{P'_B}{P - P'_B} = \frac{M_B}{M_H} \cdot \frac{\varphi \cdot P_B}{P - \varphi \cdot P_B}$$

şeklinde yazılabilir.

Burada, P_B : Hava içinde bulunan ve değeri havanın sıcaklığına göre değişen su buharının doymuş buhar basıncı olup, ilgili değerleri cetvel 11.1'de verilmiştir. Son eşitlikte havanın ve suyun molekül ağırlıkları yerine konarak;

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot P_B}{P - \varphi \cdot P_B}$$

şeklinde yazılabilir.

Havanın bağıl nemi, psikrometrik yöntemle göre düzenlenmiş cetvel değerlerinden de saptanabilir. Hava sıcaklığına ve psikrometrik sıcaklık farkına göre hesaplanmış bağıl nem oranları kitabın 185. sayfasında cetvel 11.1'de verilmiştir.

11.1.2. Nemli Havanın Entalpisi

Nemli havanın entalpisi, kuru hava ile hava içindeki su buharının entalpileri toplamına eşittir.

Belirli bir t sıcaklığında, kuru havanın entalpisi, i_h ;

$$i_h = c_{hb} \cdot t \text{ olur.}$$

Yine t sıcaklığındaki birim ağırlıktaki su buharının entalpisi i_s de;

$$x \cdot i_s = x (r_o + c_{sb} \cdot t) \text{ olup, nemli havanın toplam entalpisi } i;$$

$$i = i_h + x \cdot i_s \text{ ve}$$

$$i = c_{hb} \cdot t + x (r_o + c_{sb} \cdot t) \text{ bulunur.}$$

Eşitliklerde;

i : Nemli havanın toplam entalpisi, kcal /kg,

c_{hb} = Havanın sabit basınçta özgül ısısı, $\sim 0,236$ kcal /kg. °C,

t : Havanın sıcaklığı, °C,

x : Havanın içerdiği mutlak nem oram, kg/kg,

r_o : 1 kg suyun 0 °C'de buharlaşma ısısı, 597 kcal/kg,

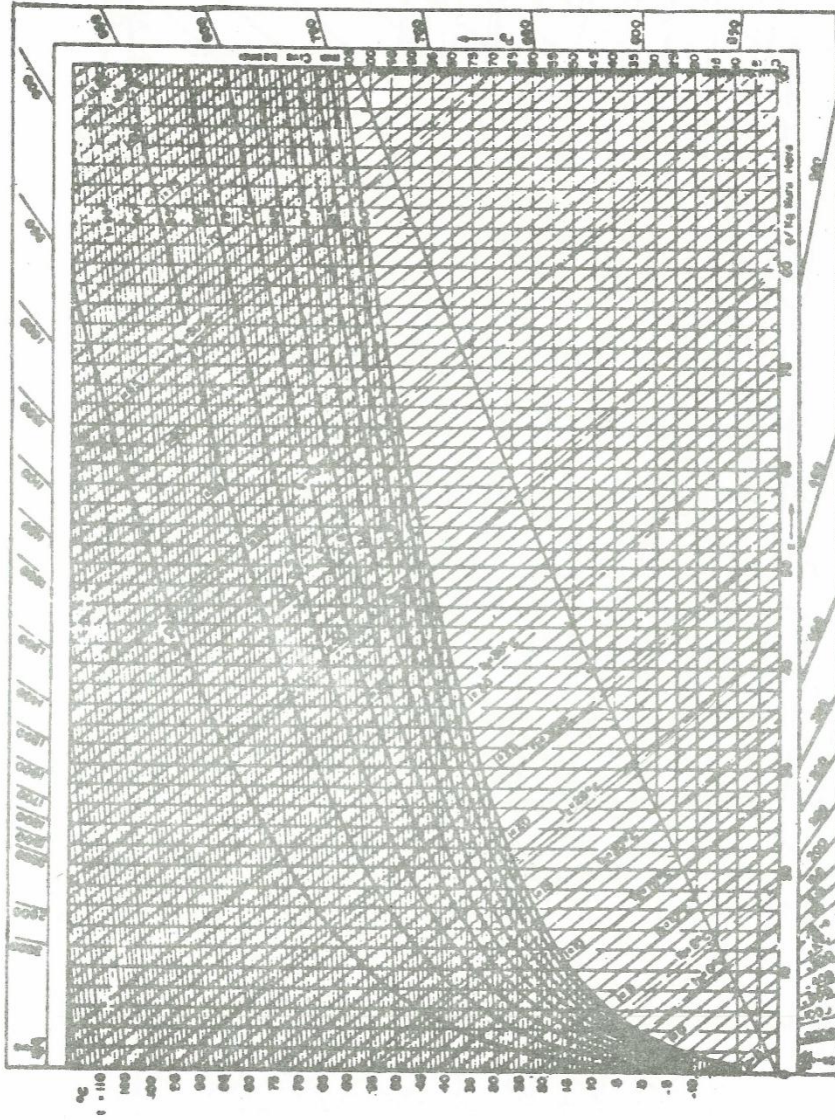
c_{sb} : Su buharının sabit basınçta özgül ısısı $\sim 0,45$ kcal/kg. °C.

İlgili değerler yerine konursa;

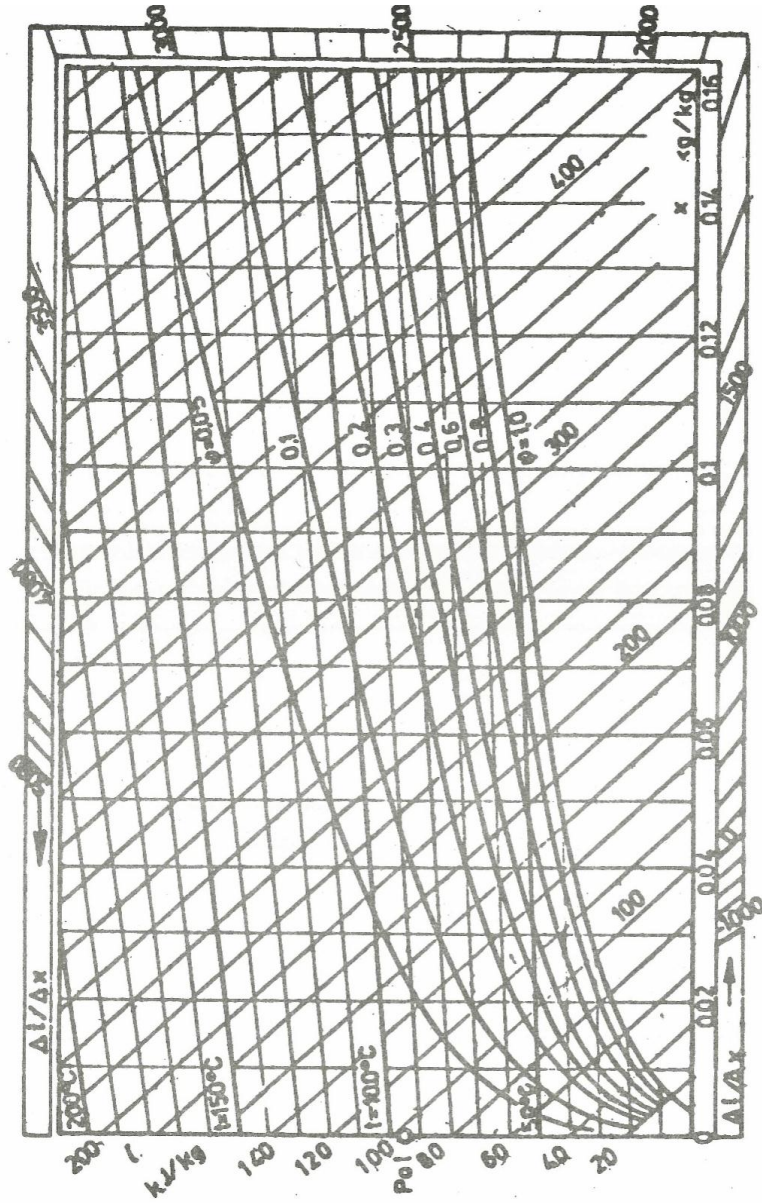
$$i = 0,236 \cdot t + x (597 + 0,45 \cdot t) \text{ yazılabilir.}$$

11.1.3. i/x Diyagramı

Sıcaklığına ve bağıl nem içeriğine göre, havanın entalpisini ve mutlak nem oranım kolayca bulabilmek için diyagramlar geliştirilmiştir. Bunlar arasında en yaygın kullanılan diyagram, i/x (MOLLIER) diyagramıdır. Şekil 11.1 ve şekil 11.2’de düşük ve yüksek hava sıcaklıkları için kullanılan MOLLIER diyagramları verilmiştir. Bu diyagramlardan okunacak değerler şunlardır: Hava sıcaklığı (t), havanın bağıl nem içeriği(φ) havanın mutlak nemi (x), havanın toplam entalpsi (i), su buharının doymuş buhar basıncı (p_B) ve kenar ölçeği olarak 1 kg suyu buharlaştırmak için gerekli ısı miktarı $\left(\frac{\Delta i}{\Delta x} \right)$.



Şekil 11.1. Düşük sıcaklıklar için geçerli MOLLIER diyagramı



(ϕ), havanın mutlak nemi (x), havanın toplam entalpisi (i), su buharının doymuş buhar basıncı (P_B), ve kenar ölçeği olarak 1 kg suyu buharlaştırmak için gereken ısı miktarı

$$\left(\frac{\Delta_i}{\Delta_x} \right)$$

Şekil 11.2. Yüksek sıcaklıklar için geçerli MOLLIER diyagramı

11.2. Kurutulacak Ürünün özellikleri

11.2.1. Üründe Bağlı Su

Kuruma olayı, ürün ile nem arasındaki bağlantı kuvvetlerinin, dışardan verilen ısı yardımıyla çözülmesiyle başlar.

Suyun ürün içinde bağlantısı üç tiptedir:

- o Fiziksel bağlantı (serbest su).
- o Kimyasal bağlantı ve
- o Fiziksel-kimyasal bağlantı.

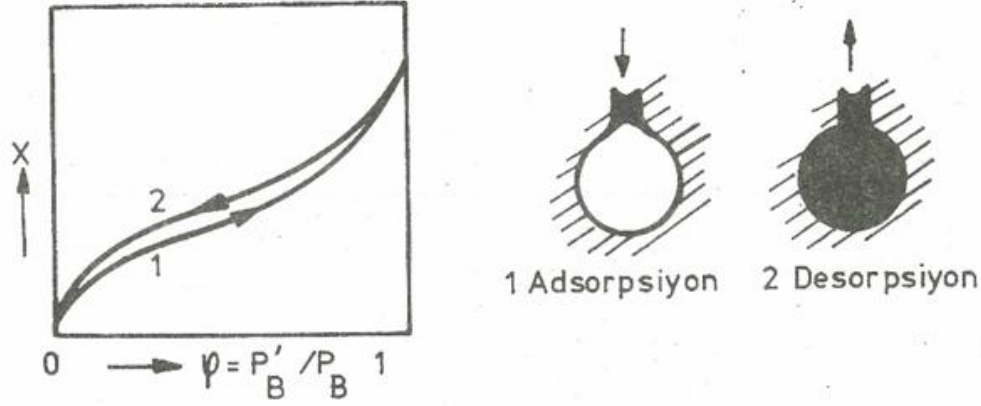
Fiziksel bağlı su, ürünün büyük hacimli iç boşluklarında tutulmuştur. Bu su, ürünün yapısına bağlı olarak, mekanik yoldan (presleme, santrifüj, emme) kolayca ayrı-labilir. Kimyasal bağlı su ise, ürün içindeki kapılar kanallarda, moleküller arasında ve moleküllerde tutulan su olup, ürüne tutunma kuvveti çok fazladır. Kimyasal bağlı, neme, aynı zamanda hidrat nemi ya da kristal nemi de denir. Bu nem, yüksek sıcaklıklarda ayrılabilir. Ancak, kimyasal bağlı nemin uzaklaştırılması ile ürünün doğal yapısı bozulur.

Fiziksel-kimyasal bağlı nem ise, ürüne bağlanması sırasında beliren bağlanma ısı ile tanımlanır. Ayrıca, bu tip suyun ürüne bağlanması ile ürünlerdeki hacim artışı, bağlanan suyun hacmine oranla daha azdır.

11.2.2. Sorpsiyon izotermeleri

Ürün, sürekli olarak temas ettiği çevre havası ile denge konumundadır. Yani, ürün içindeki su miktarı havadaki su buharının doyma basıncı ile ilgilidir. Ürün, kurutulurken su içeriği azaldıkça ozmotik kuvvetler nedeniyle, etkili buhar basıncı da küçülür. Başka bir deyişle, kurutulan ürünün aynı kurulukta muhafaza edilebilmesi için, çevre havası buhar basıncının ürüne denkleştirmesi gerekir. Böylece, çevre havasının bağıl nemi, aynı zamanda ürünün su aktivitesi olarak da adlandırılabilir. Buna göre, buhar basıncına bağlı olarak ürünlerin su tutma özelliklerine, higroskopik davranış adı verilmektedir.

Kısaca, higroskopik davranış, ürünlerin su alma, su verme ve su tutma özelliklerini içerir. Higroskopik davranışın değerlendirilmesinde, deneysel olarak saptanan sorpsiyon izotermelerinden yararlanılır. Sorpsiyon izotermeleri; havanın bağıl nem oranına bağlı olarak, ürünün birim ağırlıktaki kuru madde miktarının içerdiği mutlak nem değerlerini veren eğriler şeklindedir. Ürünlerin kurutulmasında (desorpsiyon) ve nemlendirilmesinde (adsorpsiyon), şahit sıcaklıktaki havanın, sabit bağıl nem oranları için, ürün içinde farklı iki denge nem (kalıcı nem) değeri söz konusudur. Bu nedenle sorpsiyon izotermeleri histeresis eğrisi şeklindedir (Şekil 11.3).



Şekil 11.3. Sorpsiyon izotermine ilişkin histeresis eğrisi.

Sorpsiyon izotermi sıcaklığa bağlı olarak değişir. Yüksek sıcaklıklarda, üründe su tutma kuvvetlerinin etkisi azaldığı için, aynı bağıl nem oranında tutulan su miktarı da azalır. Sorpsiyon izotermi deneysel ölçümlerle çıkarılır. Ancak, birçok araştırmacı denge neminin bulunmasında matematiksel eşitlikler geliştirmişlerdir. Kendi isimleri ile verdikleri eşitliklere örnek olarak şunlar sıralanabilir: Henderson, Langmuir, BET, Smith, Young ve Nelson eşitlikleri, Smith'e göre; su buharı, üründe iki değişik şekilde tutulur. Adsorpsiyonda, nem ya ürünün iç dokusunda kuvvetli bağlıdır, ya da ürün içinde ve yüzeyinde yoğunlaşmış şekilde bulunur. Smith'e göre denge neminin bulunmasında kullanılan eşitlik şöyledir:

$$\alpha = ab - \alpha' \ln(1 - \phi)$$

Burada;

α : Toplam bağıl nem (denge nemi) oranı, %

α_b : Yüzeysel bağıl nem, %,

α' : Moleküllerde tek katlı yoğuşan nem % ve

φ : Havanın bağıl nem miktarıdır, %.

Örneğin; 30 °C sıcaklıkta havanın çeşitli bağıl nem miktarlarına bağıl denge nem değerleri için, eşitlik;

$\alpha' = 16,81$ ve $\alpha_b = 6,75$ olup

$\alpha = 6,75 \frac{16,81}{16,81 - \varphi}$ şeklinde yazdır.

Kurutma uygulamalarında sorpsiyon izotermi, ulaşılacak denge nemi için havanın hangi sıcaklık ve bağıl nem miktarında olması gerektiğini gösterir.

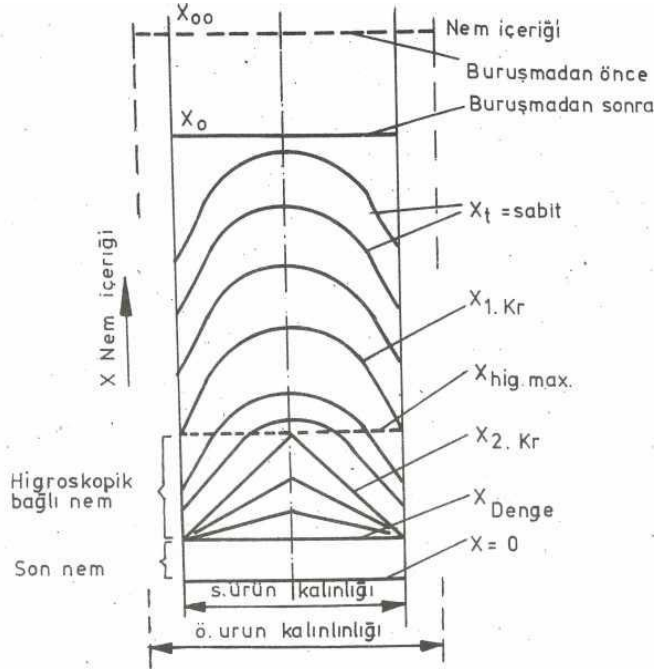
11.2.3. Kuruma Aşamaları

Su içeren ürünler, yapılarına ve içerdikleri su miktarına bağlı olarak farklı kuruma özellikleri gösterirler. Şekil 11.4'de higroskopik bir üründe, üç aşamadan oluşan kuruma sırasındaki kalitatif nem dağılımı şematik olarak gösterilmiştir.

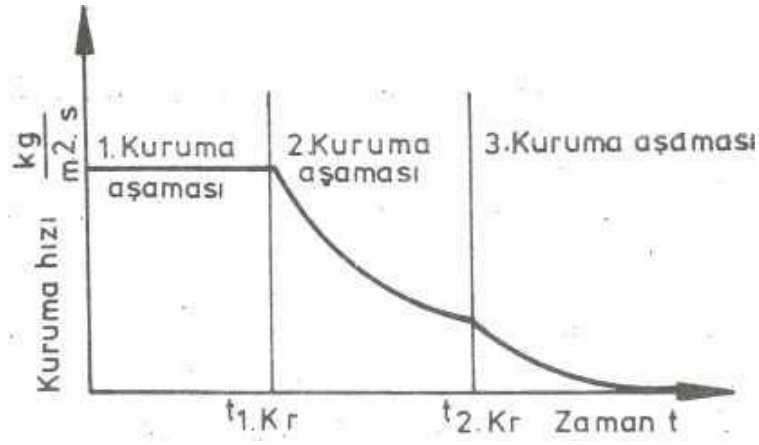
1. Kuruma aşamasında, kuruma hızı sabittir (Şekil 11.5). Bu aşama, ürün yüzeyinden serbest bağlı suyun buharlaşması şeklinde sürer.

Katı ürünlerde kurutma başlangıcında nem içeriği x_0 ise, sıvı ürünlerde başlangıç nemi x_{00} olup, ancak kuruyarak buruşma aşamasına ulaşıldığında, nem içeriği katı ürün nem içeriğine (x_0) eşdeğer olur. Bundan sonraki kuruma süresinde, yeniden buruşma olmaksızın, kapilar boşluklardaki nemin buharlaşması sürer. Bu durum, ürün üst yüzeyinde maksimum higroskopik nem miktarına ($x_{higr-max}$) erişilene dek sabit hızda gerçekleşir. Şekil 11.4'de (1. Kr) indisiyle gösterilen nem eğrilerinde, birinci kırılmanın olduğu noktada birinci kuruma aşaması sona erer (Şekil 11.5).

2. Kuruma aşamasında; serbest nem aktivitesi ürün içine doğru artarken, ürün yüzeyindeki nem miktarı, $X_{higr.max}$ değerinden denge nemine (X_{denge}) doğru yavaş yavaş azalır. Bu aşamada, ürüne ısı geçişi; ürün içinde ısı iletimi ile ürün yüzeyinden ısı taşınımının bileşimi şeklindedir. Kuruyan üst yüzeyin ısı iletim katsayısı giderek küçüldüğü için, kuruma hızı da azalır. 2. kuruma aşaması, nem eğrisinde ikinci kırılma noktasına (2.Kr) erişilene dek sürer.



Şekil 11.4. Higroskopik üründe kuruma aşamalarındaki nem dağılımı



Şekil11.5.Higroskopiküründekurumahızınınzamanladeğişimi.

11.2.4. Kurutulacak Ürünün Su İçeriği

Bir ürünün su içeriği iki şekilde tanımlanır. Kuru baz esasına göre su içeriği; ürün içindeki su miktarının (MSU) ürünün kuru madde miktarına (MKM) oranıdır:

$$X = \frac{M_{SU}}{M_{KM}} \cdot 100$$

Yaş baz esasına göre su içeriği ise; ürün içindeki su miktarının (M_{SU}) ürünün toplam miktarına ($M_{SU}+M_{KM}$), oranıdır.

$$U = \frac{M_{SU}}{M_{SU} + M_{KM}} \cdot 100$$

Bu değerler şu şekilde birbirilerine dönüştürülebilir;

Bağıl nem;
$$U = \frac{100 \cdot x}{100 + x}$$

ya da mutlak nem;

$$X = \frac{100 \cdot U}{100 - U}$$

Kurutma ile ürünün katı maddesinde değişme olmaksızın su miktarı azaltılır.
Kurutmada üründen uzaklaştırılan su miktarı şöyle bulunur:

$$\Delta M = S = M_b \frac{U_b - U_k}{100 - U_k} \text{ ve}$$

$$M_k = M_b - S$$

Eşitliklerde;

$\Delta M = S$: Üründeki ağırlık azalması ya da buharlaştırılan su miktarı, kg,

M_b : Ürünün başlangıçtaki ağırlığı, kg,

U_b : Ürünün başlangıçtaki su içeriği, %,

U_k : Kurutma sonunda ürünün su içeriği, % ve

M_k : Kurumuş ürünün ağırlığıdır, kg.

Hava ile kurutmada, kurutma süresi; üründen çekilecek su miktarına, kurutma havası debisine ve havanın su buharı alabilme yeteneğine bağlıdır. Kurutma süresi (t) ve kurutma hızı (v_k) şu eşitliklerde hesaplanabilir:

$$t = \frac{1000.S}{\Delta x.V} \text{ ve } v_k = \frac{S}{t}$$

Burada;

t: Kurutma süresi, h,

S: Buharlaştırılacak su miktarı, kg,

Δ_x : Havanın nem alabilme yeteneği, g /m³ (g/kg),

V: Hava debisi, m³/h ve

v_k : Kurutma hızıdır $\frac{kg}{kg.h} \left(\frac{g}{kg.h} \right)$.

11.3. Kurutma İşlemi

Hava aracılığı ile gerçekleştirilen kurutmada, havanın nem alma yeteneğine ve hava miktarına bağlı olarak, üründen alınacak su için gerekli ısı miktarı (Q) şu şekilde hesaplanır (Şekil 11.6).

$$Q = H \cdot (i_2 - i_1) + M_k \cdot c_{\ddot{u}}(t_2 - t_1) + S_2 \cdot c \cdot (t_2 - t_1) - t_1 \cdot c \cdot (S_1 - S_2)$$

Eşitlikte;

Q: Kurutma havasına ya da kuruyacak ürüne verilen toplam ısı, kcal,

H: Kurutma havasının ağırlığı, kg,

$(i_2 - i_1)$: Kurutma havasının entalpi artışı, kcal /kg,

M_k : Kurutulan ürün içinde, kuru ürün ağırlığı, kg,

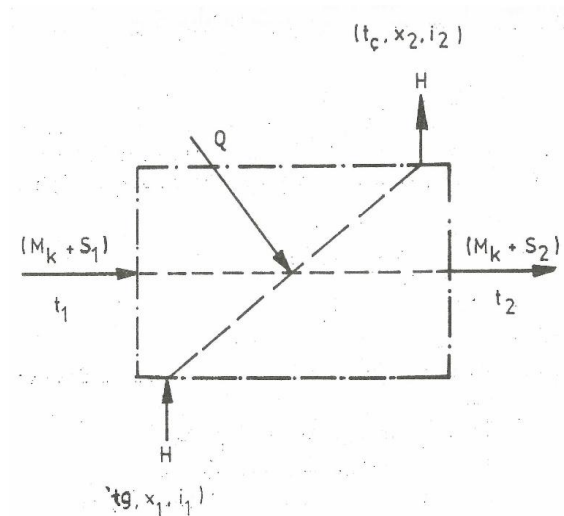
$c_{\ddot{u}}$: Kurutulan ürünün özgül ısısı, kcal/kg °C,

$(t_2 - t_1)$: Ürünün son ve başlangıç sıcaklıkları farkı, °C

S_2 : Kuru ürün içinde kalan denge nemi, kg,

c: Suyun özgül ısısı, 1 kcal /kg °C ve

S_1 : Kurutulmadan önce ürünün su içeriğidir, kg.



Üründen buharlaşan su, havaya geçerek havanın mutlak nemi x_1 'den x_2 'ye çıkar. Yani

$$S_1 - S_2 = H \cdot (x_2 - x_1)$$

yazılabilir. Ya da

$$\frac{H}{S_1 - S_2} = \frac{1}{x_2 - x_1}$$

olur.

Kurutucuların hesaplanmasında, birim ağırlıktaki (1 kg) suyun buharlaştırılmadı için gerekli toplam ısı miktarı (özellik ısı gereksinimi) temel değerdir. En iyi çalışan kurutucularda özellik ısı gereksinimi 800-900 kcal /kg. su kadardır. Özellik ısı gereksinimi;

$$\frac{Q}{S_1 - S_2}$$

1 kg suyu buharlaştırmak için gerekli ısıdır ve birimi kcal/kg su olur.

Toplam ısı eşitliğini buna değiştirirsek;

$$\frac{Q}{S_1 - S_2} = \frac{H(i_2 - i_1)}{S_1 - S_2} + \frac{M_k \cdot c_{\ddot{u}}(t_2 - t_1)}{S_1 - S_2} + \frac{S_2 \cdot c(t_2 - t_1)}{S_1 - S_2} - \frac{t_1 \cdot c \cdot (S_1 - S_2)}{S_1 - S_2}$$

$\frac{H}{S_1 - S_2}$ yerine de $\frac{1}{x_2 x_1}$ değeri konarak,

$$\frac{Q}{S} = \frac{i_2 - i_1}{x_2 - x_1} + \frac{M_k \cdot c_{\ddot{u}}(t_2 - t_1)}{S} + \frac{S_2 \cdot c \cdot (T_2 - t_1)}{S} - t_1 \cdot c$$

olup, eşitlikteki son üç terim küçük olup, ihmal edilebilir. Buna göre, özgül ısı gereksinimi

$$H = \frac{S}{x_2 - x_1}$$

ya da başlangıç koşullarında nemli hava olarak

$$H_s = \frac{S}{x_2 - x_1} (1 + x_1)$$

Burada;

H: Kuru hava miktarı kg/h ve

H_s: Nemli hava miktarıdır, kg

11.4. Kurutma Yöntemleri ve Kurutucular

Gıda ve benzeri ürünlerin çok çeşitli olması nedeniyle kurutulacak ürünün özel-liğine uygun kurutucuların sınıflandırılması çok karmaşıktır. Kurutmada önemli üç kri-tere göre kurutucular şu şekilde sınıflandırılabilir;

Isı geçiş şekline göre kurutucular;

- Isı iletimli (konduksiyon-kontakt) kurutucular
- Isı taşınımı (konveksiyon) kurutucular
- Isıl ışımali (radyasyon) kurutucular.

Isı geçişine doğrudan etkili olmaları nedeniyle, bu sınıflamaya ayrıca şu kurutucular da katılabilir;

- Vakum kurutucular,
- Dondurarak kurutma yapan kurutucular ve
- Dielektriksel yöntemle kurutma yapan kurutucular.

İkinci olarak, çalışma koşuluna göre kurutucular iki tiptir:

- Sürekli çalışan (kontinü) kurutucular ve
- Kesintili çalışan (porsiyonvari) kurutucular

Kurutulacak ürünün hareketine göre ise;

- Durgun tabakalı kurutucular,
- Hareketli tabakalı kurutucular ve
- Aerosol (pnömatik) kurutucular olarak ayrılabilir.

Uygun kurutucu tipinin seçiminde göz önüne alınacak ürün özellikleri şöyle sıralanabilir: Ürünün yapısı, büyüklüğü, nem içeriği, kurumaya karşı hassasiyeti, hava direnci, hava geçirgenliği, kuruma hızı, ısı iletim yeteneği vb. Ayrıca, ürünün kurutulacağı üst sıcaklık değeri bilinmelidir. Çünkü bu değer uygulanacak ısı geçiş türünün belirlenmesini sağlar. Ürünün kuruma süresi ve bu sürede bozulma sınırları ile üründe kuruma sırasında oluşacak yapı değişiklikleri de (ovalama, kırılma vb.) bilinmelidir.

12. SOĞUTMA TEKNİĞİ

Çoğu gıda ürünlerinde, bozulmaya ve çürümeye neden olan mikroorganizma ve enzim faaliyeti, 0 °C civarındaki ortam sıcaklıklarında büyük ölçüde engellenir. Bu nedenle, ürünlerin soğutulması ve soğukta muhafaza edilmesi ile uzun süre taze kalmaları sağlanabilir. Ne var ki, soğutmadaki koşulların, üründe oluşacak üşüme ve donma kayıplarının en az olacağı şekilde belirlenmesi gerekir. Öte yandan, soğutma depolarının, üretim yapılan yere en yakın konumda kurulması da unutulmamalıdır.

12.1. Soğukluk Üretimi

Soğukluk genel olarak iki yöntemle üretilebilir.

Bunlar;

- Kimyasal yöntem
- Fiziksel yöntem.

Kimyasal yöntemle soğukluk sağlanmasında, bazı maddelerin birbiriyle karıştırılmasıyla, bulunulan sıcaklıktan daha düşük sıcaklıklar elde edilmektedir. Bu yöntemle soğukluk üretimine neden, karışım oluşurken çevreden ısı enerjisi çekilerek sıcaklığın düşmesidir. Bu yöntemden, ancak laboratuvar koşullarındaki uygulamalarda yararlanılmaktadır.

Kimyasal yöntemle örnek olarak kar ya da buzun bazı kimyasal maddeler ile karışımında, elde edilen düşük sıcaklık değerleri cetvel 12.1de verilmiştir.

Cetvel 12.1. Bazı kimyasal maddelerin kar ya da buz ile karışımındaki elde edilen sıcaklıklar (ilk sıcaklık değerleri 0 °C dir).

Karışımın ağırlık oranı	Karışım sıcaklığı (°C)
% 65 kar (buz) + % 35 NaCl	— 20
% 60 kar (buz) + % 40 H ₂ SO	— 30
% 45 kar (buz) + % 55 CaCl	— 40
% 43 kar (buz) + % 57 KOH	— 46

Fiziksel yöntemle soğutma; sıvıların buharlaşırken çevreden ısı enerjisi çekmesi esasına dayanır. Buharlaşma sırasında alınan ısı nedeniyle, çevrenin sıcaklığı düşerek doğal yoldan soğukluk sağlanır.

Alkol, su gibi maddelerin buharlaşması sırasında çevreden aldıkları ısı enerjisi azdır. Yani, üretilen soğukluk küçüktür. Uygulamalarda, istenilen düzeyde soğukluk üretebilmek için, buharlaşma ısıları yüksek olan maddeler kullanılır. Bunlara, soğutucu akışkanlar adı verilmektedir. Sıvı haldeki soğutucu akışkanlar, normal atmosfer koşullarında buharlaşarak çevreden büyük ısı enerjisi çekerler. Fiziksel yöntemle soğukluk üretiminde, soğutma işinin sürekliliğinin sağlanabilmesi için, buharlaşarak gaz haline geçen soğutucu akışkanın tekrar sıvılaştırılması gerekir. Başka bir deyişle, soğutucu akışkanın kapak bir çevrimi izlemesi gerçekleştirilmelidir. Bu çevrimde, soğutucu akışkan, soğukluk istenen yerde buharlaştırılıp gaz haline geçer. Gaz halindeki akışkanın tekrar sıvı hale geçirilmesi için ise, yüklendiği ısı alınır. Yani soğutulur.

« Bir iş harcamadan, ya da sıcak kaynağın soğuk kaynağa ısı vermesi sağlanmadan, soğuk kaynaktan sıcak kaynağa ısı geçirmek olanaksızdır», olarak bilinen termodinamiğin 2. yasasına göre; soğukluğu sağlayan soğutucu akışkanın ters yönde bir çevrimi izleyebilmesi için (başka bir deyişle, soğuk kaynaktan aldığı ısıyı sıcak kaynağa verebilmesi için), soğutucu akışkana mutlak olarak bir iş verilmesi gerekir. Soğutucu akışkana verilen iş, çoğunlukla mekanik yoldan gerçekleştirildiği için, uygulamada fiziksel soğutma yöntemine *mekanik soğutma* adı verilmektedir.

12.1.1. Soğutucu Akışkanlar

Mekanik soğutmada, soğutucu akışkan olarak kullanılacak maddelerde aranan özellikler şöyle sıralanabilir:

- Soğutma gücünün yüksek olabilmesi için soğutucu akışkanın buharlaşma ısısı büyük olmalıdır.
- Soğutucu akışkanın, atmosfer basıncındaki buharlaşma sıcaklığı düşük olmalıdır.
- Soğutucu akışkan, yanıcı ya da patlayıcı özellikte olmamalıdır.
- Zehirli olmamalıdır.
- Su ve yağdan etkilenmemelidir.
- Aşındırıcı özelliği olmamalıdır.
- Fiyatı ucuz olmalı ve kolay bulunabilmelidir.
- Kapak soğutma devrelerinde olabilecek kaçak ve sızıntıların kolayca bulunabilmesine olanak vermelidir.

Yukarıda sıralanan özelliklerin hemen hemen tümüne sahip olan soğutucu akışkanlar, freon ve bileşimleridir. En çok kullanılan freon bileşimleri ise; freon-12 (F-12) ve freon-22 (F-22) dir. Öte yandan, bazı istenmeyen özellikleri olan şu soğutucu akışkanlar da kullanılmaktadır: - Amonyak (NH₃),

- Karbondioksit (CO₂),
- Metilklorid (CH₃Cl),
- Kükürtdioksit (SO₂) vb.

Freon 12, freon 22 ve amonyak soğutucu akışkanlarının fiziksel özellikleri topluca cetvel 12.2’de verilmiştir.

Cetvel 12.2. Freon 12, freon 22 ve amonyak soğutucu akışkanlarının fiziksel özellikleri.

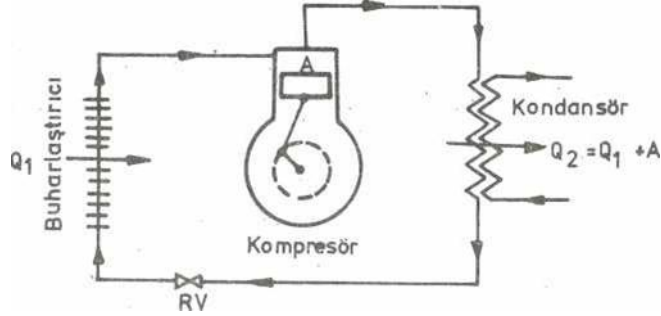
Özellik	Birim	Amonyak	Freon 12 (F-12)	Freon 22 (F-22)
Kimyasal formülü		NH ₃	CF ₂ Cl ₂	CHF ₂ Cl
Molekül ağırlığı	-	17,032	120,92	86,48
Atmosferbasıncındabuharlaşma sıcaklığı	°C	—33,3	— 29,80	— 40,80
Donma noktası	°C	—77,9	—155	— 160
Kritik basınç	bar (= 10 ⁵ Pa)	112,8	40,1	49,1
Kritik sıcaklık	°C	132,4	112	96
Özgül ısı; sıvı		1,06	0,204	0,26
gaz	kcal/kg. °C	0,52	0,141	0,145
Yoğunluk (21 °C)	kg/ltr.	0,682	1,329	1,215
Su ile çözeltisi (30 °C)	g/100 g	—	0,012	0,15
Adyabatik üsleri	Cp / Cv	1,31	1,15	1,19

12.2. Mekanik Soğutma

Mekanik soğutmaya ilişkin kapalı çevrimi içeren tesis, dört temel yapı taşından oluşur.

Bunlar (Şekil 12.1):

1. Soğutucu akışkana iş veren organ (örneğin, kompresör ve hareket ünitesi).
2. Buharlaştırıcı (evaporatör).
3. Yoğuşturucu (kondansör).
4. Regülatör ventili ve öteki yardımcı organlardır.



Şekil 12.1. Mekanik soğutma tesisinin ana organları.

Soğutma makinesi, termik makinelerde olduğu gibi, sıcaklıkları farklı iki ısı kaynağına bağlı olarak çalışır. Termik makine, sıcak kaynaktan aldığı ısının bir kısmını mekanik enerjiye dönüştürüp öteki kısmını da soğuk kaynağa aktarmasına karşın; soğutma makinesi soğuk kaynaktan aldığı ısıyı, verilen mekanik enerji yardımıyla sıcak kaynağa iletir.

Soğutma tesisinde buharlaştırıcının görevi, düşük basınçta soğutucu akışkanın buharlaşarak çevreden ısı çekmesini sağlamaktır. Soğutucu akışkana işveren organ (kompresör) ise, buharlaştırıcıda gaz haline geçen soğutucu akışkanı emip sıkıştırarak, kondansöre iletir. Böylece, soğutucu akışkanın kondansör girişindeki ısı içeriği, buharlaştırıcıda çevreden aldığı ısı ile kompresörün verdiği işin ısı eşdeğeri toplamı kadardır. Kondansörde, soğutucu akışkan taşıdığı ısı enerjisini vererek yoğunlaşır. Soğutma devre-sini tamamlayan regülatör ventili ise, soğutucu akışkanı, buharlaştırıcıya giriş sıcaklığı ile buharlaştırıcıdan çıkış sıcaklığı arasındaki farka (süperhit miktarı) göre buharlaştırıcıya iletir. Kondansör ile buharlaştırıcı arasındaki basınç farkının büyük olmaması için, süperhit miktarı 2 - 6,5 °C kadar olmalıdır.

Soğutma devrelerinde bulunan yardımcı elemanlar ise şunlardır: Soğutucu akışkan için yedek sıvı haznesi, nem tutucu, elektroventiller, soğutucu akışkan miktarının kontrol edilmesine yarayan düzenler, ısı dönüştürücü, sıvı ayırıcı, yağ ayırıcı, kompresör çıkışında ara soğutucu ve buharlaştırıcı basınç regülatörüdür.

Kompresör ve regülatör ventili, kapalı soğutma devresini ikiye bölen elemanlardır. Soğutucu akışkan; kompresör-kondansör ile kondansör-regülatör ventili arasında yüksek basınç altında (yüksek basınç devresi) ve regülatör ventili-buharlaştırıcı ile buharlaştırıcı-kompresör arasında da düşük basınç altında (düşük basınç devresi) bulunur, öte yandan, kompresör-kondansör arasında gaz halinde olan soğutucu akışkan, kondansör çıkışında kısmen ve kondansör-regülatör ventili arasında da tamamen yoğunlaşır. Buharlaştırıcıya sıvı halde gelen soğutucu akışkan, buharlaşarak kompresöre dek gaz durumunu sürdürür.

Mekanik soğutma yapan soğutma tesisleri, buharlaştırıcıda ısı geçiş aşamasına göre iki ana grupta incelenir. Bunlar; doğrudan (direkt) soğutma tesisleri ve dolaylı soğutma tesisleridir.

- Doğrudan soğutma yapan tesislerde, buharlaştırıcı, doğrudan soğutulacak ortam ile temas eder. Bu durumda ısı geçişi bir aşamada gerçekleşir.
- Dolaylı soğutma tesislerinde ise, buharlaştırıcı, soğukluğun biriktirildiği bir ara madde (salamura) içine yerleştirilir. Salamura, -37°C 'ye dek akışkan özelliğe sahip olup, bir dolaşım pompası ile soğutulması istenen ortama sevk edilir. Bu durumda; soğutucu akışkandan salamuraya ve salamuradan da soğutulacak ortama olmak üzere, iki aşamalı ısı geçişi söz konusudur.

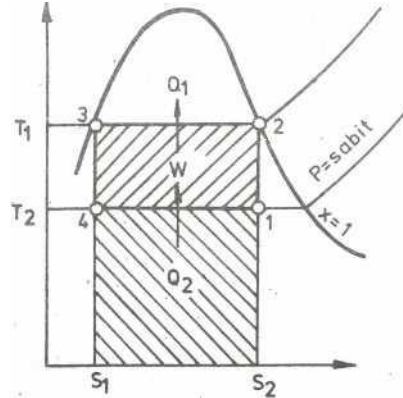
Doğrudan soğutma, daha çok küçük kapasiteli uygulamalarda yaygındır. Dolaylı soğutma ise, soğukluğun depolanabilir olması, farklı sıcaklıklarda soğutma yapılabilmesi vb. nedenlerle büyük kapasiteli uygulamalarda kullanılır.

12.2.1. Teorik (Kuramsal) Soğutma Çevrimi

Basınç (P) ve hacim (V) eksenlerinden oluşan koordinatlar sisteminde en az iki eğri tarafından sınırlanan kapalı dönüşüme çevrim denir. Kapalı dönüşümde ilk ve son durumlar özdeştir. Yani, maddesel sistem çevrim sonunda ilk durumuna gelir. Çevrim, saatin dönü yönünde olursa, maddesel sistem çevreye mekanik enerji verir (termik makine) Çevrim ters yönde ise, bu kez, çevreden maddesel sisteme, mekanik enerji verilir (soğutma makinesi).

Çevrimlerin belirlenmesinde ve özelliklerinin saptanmasında, çeşitli termodinamik koordinatlara göre düzenlenmiş diyagramlardan yararlanır. Basınç ve hacim koordinatlarına göre düzenlenmiş diyagram CLAPEYRON; sıcaklık ve entropiye göre düzenlenmiş diyagram ANTROPİK; basınç ve entalpiye göre düzenlenmiş diyagram da ENTALPİK diyagramlar olarak adlandırılır.

Soğutma tekniğinde geçerli negatif CARNOT çevrimi; T_1 ve T_2 sıcaklık sınırları arasında maddesel sistemin izlediği iki izoterm ile iki adiabatın oluşturduğu çevrimdir. Şekil 12.2'de negatif CARNOT çevrimine ilişkin antropik diyagram verilmiştir. Negatif çevrim boyunca mutlak sıcaklığı T_2 olan ısı kaynağından çekilen ısı, mutlak sıcaklığı T_1 olan ısı kaynağına geçirilir ve bu sırada bir iş (W) harcanır.



Şekil 12.2. Negatif CARNOT çevriminin antropik diyagramı.

Mutlak sıcaklığı T_2 olan ısı kaynağından çekilen ısı miktarı Q_2 ; mutlak sıcaklığı T_1 olan ısı kaynağına aktarılan ısı miktarı da ise;

$$Q_1 = T_1 \cdot (S_2 - S_1) \text{ ve } .$$

$$Q_2 = T_2 \cdot (S_2 - S_1) \text{ olur, öte yandan,}$$

$$Q_1 = W + Q_2 \text{ olduğundan}$$

$$W = (T_1 - T_2) \cdot (S_2 - S_1) \text{ yazılabilir.}$$

Burada, W ısıyı geçirmek için harcanan işin ısıl eşdeğeridir (kj/kWh ya da kcal/kWh).

Soğutulan ortamda çekilen ısı miktarının, harcanan işe oranına soğutma etkisi (SE), ya da güç katsayısı denir.

$$SE = \frac{Q_2}{W}$$

$$SE = \frac{T_2(S_2 - S_1)}{(T_1 - T_2) \cdot (S_2 - S_1)} \text{ ve } SE = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

bulunur.

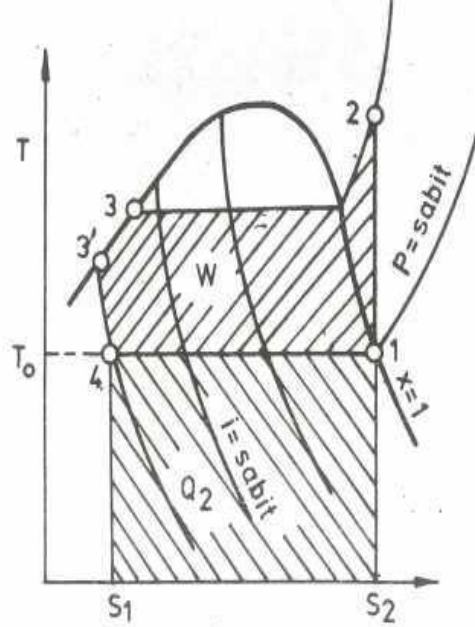
Buna göre, T_2 ve T_1 mutlak sıcaklık sınırları arasında, soğutma etkisi en büyük çevrim, negatif CARNOT çevrimidir. Soğutma etkisinin artırılması, ısı çekilen kaynak ile ısı verilen kaynak arasındaki sıcaklık farkının ($T_1 - T_2$) küçük olmasını gerektirir. Bu olgu, soğutma devrelerindeki buharlaştırıcı ve kondansör sıcaklıklarının sınırlanmasını zorunlu kılar.

Soğutma tesislerinde ulaşılan gerçek frigori miktarı, kuramsal frigori miktarının (negatif CARNOT çevrimi) en çok % 60'ı kadardır. Buna neden, ideal soğutma çevriminin uygulamada tam olarak gerçekleştirilemeyişidir. Öyle ki, tam anlamıyla bir ısı yalıtımı söz konusu olmadığından adiyabatik bir değişme de olanaksızdır. Bunun yerine politropik değişim gerçekleşmektedir.

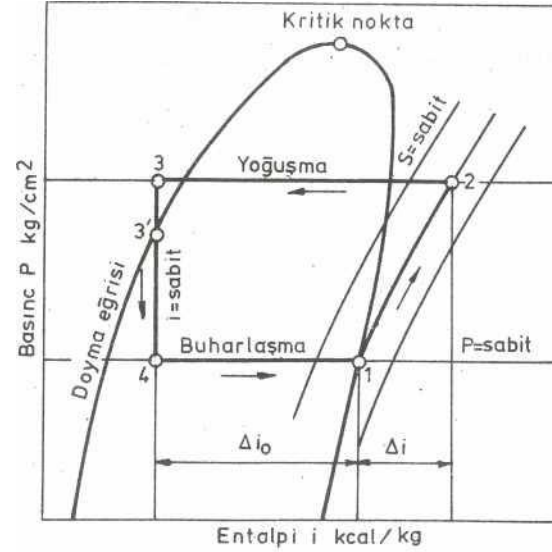
12.2.2. Gerçek Soğutma Çevrimi

Gerçek soğutma çevriminin antropik diyagramı şekil 12.3'te verilmiştir. Buna göre, 1 noktasında kompresör silindrine emilen kuru doymuş buhar, adiyabatik sıkıştırma sonunda sıcaklığı artarak 2 noktasında kızgın buhar oluşur. Basıncı artırılan soğutucu akışkan kondansöre sevk edilip, 2-3 hattında soğutularak yoğuşturulur. Soğutma gücünü artırabilmek için, kondansörde yoğuşan soğutucu akışkan, yoğuşma sıcaklığı altına (3') dek soğutulur. Yoğuşan soğutucu akışkanın soğutma yapabilmesi için adiyabatik genişletilmesi gerekir. Bu amaç ile ya bir genişleme makinasından ya da, ucuz olduğu için, çoğunlukla basınç regülatöründen yararlanılır. Böylece, regülatör ventilinde, 3'-4 hattı boyunca basıncı ve sıcaklığı düşen sıvı haldeki soğutucu akışkan, 4 noktasında evaporatöre (buharlaştırıcıya) girer. 4-1 hattında, çevreden ısı çekerek buharlaşan soğutucu akışkan, 1 noktasında kuru doymuş buhar halinde tekrar kompresöre girer.

Buhar tekniğinde antropik diyagramlar (TS ve İS) kullanılmasına karşın, soğutma tekniğinde çoğunlukla entalpik diyagramlar (Pi) kullanılmaktadır. Çünkü basınç ve entalpi koordinatlarına göre düzenlenen entalpik diyagramlarda, sabit basınç ve sabit entalpide oluşan çevrim, düz doğrular şeklinde görünür. Şekil 12.4'te soğutma çevriminin entalpik diyagramı verilmiştir.



Şekil 12.3. Gerçek soğutma çevriminin antropik diyagramı



Şekil 12.4. Soğutma çevriminin entalpik diyagramı

12.2.3. Özgül Soğutma Gücü

İdeal soğutma çevriminin soğutma gücü; soğutma etkisi (SE) değeri (ya da güç katsayısı değeri) ile kompresörde verilen işin ısı eşdeğeri çarpımına eşittir. Yani;

$$Q_2 = SE.W$$

Öte yandan, 1kWh işin ısı eşdeğeri 860 kcal değeri yerine konursa ($W = 860 \text{ kcal/kWh}$) ideal soğutma çevriminin özgül soğutma gücü;

$$Q_2 = SE.860 = 860. \frac{T_2}{T_1 - T_2} \text{ kcal / kWh}$$

bulunur.

Gerçek soğutma çevriminin kuramsal özgül soğutma gücü ise; Şekil 12.4'e göre, şöyle yazılır:

$$K_{\text{öSg}} = 860. \frac{\Delta i_o}{\Delta i} \text{ kcal / kWh}$$

Burada;

$\Delta i = i_2 - i_1$: Kompresördeki politropik sıkıştırma işinin ısı eşdeğeri, kcal/kg ve

$\Delta i_o = i_2 - i_4$: Çevreden alınan ısı ya da soğutma gücüdür, kcal/kg.

Özgül soğutma gücü değerleri, soğutucu akışkanın özelliklerine göre farklıdır.

Ancak, bu fark çok küçük olup % 2 - 3 kadardır, öte yandan, genel olarak buharlaşma sıcaklığı büyüdükçe, özgül soğutma gücü de artar.

12.2.4. Volumetrik Soğutma Gücü

Kompresör hesaplanmasında yararlanılan volumetrik soğutma gücü değeri Q_v (kcal/m^3), doymuş buhar haline geçen birim hacim soğutucu akışkanın, buharlaştırıcıdaki yararlı soğutma gücüdür.

$$Q_v = \frac{\Delta io}{V''} = \frac{i_1 - i_4}{V''}$$

Burada;

Q_v : Volumetrik soğutma gücü, kcal/m^3 ,

Δio : Çevreden alınan ısı, kcal/kg ve

V'' : Buharlaşma sıcaklığında soğutucu akışkanın özgül hacmidir, m^3/kg .

Buna göre, volumetrik soğutma gücü, regülatör ventilinin alt soğutma sıcaklığı (yoğuşma) ile buharlaşma sıcaklığına bağlıdır (Şekil 12.4). Soğutma gücü, buharlaşma ve yoğuşma sıcaklıklarına bağlı olarak değişmektedir. Uygulamada, soğutma tesislerinin karşılaştırılabilmesi için, belirlenmiş buharlaştırma ve yoğuşma sıcaklıklarındaki (normal sıcaklıklar) soğutma güçleri saptanır. Normal soğutma gücü için geçerli normal sıcaklık değerleri Cetvel 12.2'de verilmiştir:

Cetvel 12.2. Normal soğutma gücü için söz konusu normal sıcaklıklar.

	Su Soğutmalı		Hava soğutmalı
	(Avrupa)	(USA)	
Buharlaştırma sıcaklığı t_0 (°C)	— 10	— 15	— 15
Yoğuşma sıcaklığı t (°C)	25	30	40
Regülatör ventili önündeki sıcaklık t_u (°C)	15	25	30

Öte yandan iklimlendirme amaçlı soğutma tesislerinde, buharlaşma sıcaklığının 0 °C alınması yeterlidir.

12.3. Soğutma Sistemleri

Soğutma tekniğinde, soğutucu akışkanın buharlaştırıcıdan kondansöre iletilmesi ve soğutma devresinin yapısına göre, kullanılan sistemler üç ana grup altında incelenebilirler. Bunlar:

- Sıkıştırımlı soğutma tesisleri.
- Su buharı ejektörlü (taşıyıcılı) soğutma tesisleri.
- Absorpsiyonlu soğutma tesisleri.

Ayrıca, bu üç grup dışında, doğrudan buz ile soğutma yapılan tesisler de mevcuttur. Bunlarda, depolanan buz bloklarına su püskürtülerek elde edilen soğuk su soğukluk istenilen yere iletilir.

12.3.1. Sıkıştırılmalı Soğutma Tesisleri

Soğutucu akışkanın sıkıştırılma işinde kullanılan kompresörlerin tipine göre, sıkıştırmak soğutma tesisleri üç grup altında incelenebilir:

- Pistonlu kompresörlü,
- Turbo kompresörlü ve
- Döner hareketli kompresörlü.

Pistonlu kompresörlü soğutma tesisleri, uygulamada en yaygın kullanılan tesisler olup, silindirin boyuna ekseninin konumuna göre; yatay ve dikey silindirli tipleri vardır. Dikey silindirli kompresörler, küçük kapasiteli soğutucu devrelerde tercih edilirler ve tek ya da çift silindirli yapırlar. Yatay silindirli kompresörler ise büyük kapasiteli soğutma tesislerinde kullanılırlar.

Turbo kompresörlü soğutma tesislerinde, soğutucu akışkanın sıkıştırılması için turbo kompresör kullanılmaktadır. Çok büyük soğutma gücü gereksinilen ve ekonomik soğutma istenilen uygulamalarda kullanılırlar. Örneğin, soğutma gücü 150000 kcal/h alt sınır değeridir. Turbo kompresörlü soğutucuların bazı avantajları şöyle sıralanabilir: özgül yer gereksinimleri küçüktür, bakım-tamiri, azdır, soğutma gücü kolay ayarlanabilir, yağlama sorunu yoktur ve sessiz çalışır.

Döner hareketli kompresöre sahip soğutma tesislerinde, soğutucu akışkan, ek-santrik silindirli pistonlar ile sıkıştırılmaktadır. Turbo kompresörlü tesislerde olduğu gibi, bunlar da çok yüksek soğutma kapasiteli soğutma tesislerinde kullanılmaktadır.

12.3.2. Su Buharı Ejektörlü (Taşıyıcı) Soğutma Tesisleri

Soğutucu akışkan olarak su kullanılan ve soğutma sıcaklığı 0 °C'nin üzerinde olan soğutma tesislerinde uygulanan bu sistemde; basınçlı su buharı huzmesinin ventüri memesinden geçerken yüksek hızlara (800 - 1000 m /s) ulaşması nedeniyle, çevresinde oluşturduğu düşük basınç ile buharlaştırıcıdaki suyun bir kısmının buharlaşması sağlanır. Buharlaşan su, buhar kazanından gelen yüksek hızlı buhar huzmesine karışarak kondansöre taşınır ve yoğuşarak tekrar buharlaştırıcıya döner. Buharlaştırıcıda bulunan su, bir kısmının buharlaşması ile soğur. İşte, bu su, soğukluğun gereksinildiği yerlere sevk edilerek soğutma işi yapılır.

Tehlikesiz ve ucuz olan suyun, soğutucu akışkan olarak kullanılması nedeniyle bu tip tesisler daha çok iklimlendirme amacıyla soğutma işlerinde kullanılırlar. Ancak, tesisin ekonomikliği, yararlanılan basınçlı buhar tüketimiyle sınırlıdır. Buhar tesisatındaki artık buhardan yararlanılması idealdir.

12.3.3. Absorbsiyonlu Soğutma Tesisleri

Bu tip tesislerde, buharlaşan soğutucu akışkanın sıkıştırılarak kondansöre sevk edilmesinde, mekanik çalışan herhangi bir organ yoktur. Bu amaç için bir absorbsiyon sisteminden yararlanılmaktadır.

Absorbsiyon sisteminde, soğutma tesisinde kullanılan soğutucu akışkanı buhar halinde absorbe ederek bileşen ve ayrı bir bölümde ısıtılmasıyla soğutucu akışkanı tekrar buhar halinde serbest bırakan bir absorber (emici) maddeden yararlanır. Buharlaştırıcıda çevreden ısı alarak buharlaşan soğutucu akışkan, sıvı haldeki absorber madde tarafından emilir. Daha sonra, absorber madde ısıtma bölümüne iletilerek ısıtılır. Isıtılma sırasında, soğutucu akışkan absorber maddeden tekrar buhar halinde ayrılarak kondansöre geçer. Kondansörde, taşıdığı ısıyı veren soğutucu akışkan, sıvı hale geçer ve devresini tamamlamak üzere regülatör ventiline iletilir. Absorpsiyonlu soğutma tesislerinde absorber olarak amonyak ve lityum tuzlarının su ile karışımları kullanılmaktadır. Bu tip tesislerde soğutma etkisi ya da güç katsayısı öteki tesislerden çok küçüktür ($SE = 0,4 - 0,75$). Ekonomik işletme koşullarının sağlanabilmesi için ısıtma devresinde, varsa buhar tesisatındaki artık buhardan yararlanılması uygundur. Soğutma gücünün ayarlanması, absorber yoğunluğunun değiştirilmesiyle sağlanmaktadır.