

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Kimyasal Metalurji

Kurutma İşlemleri

Dr. Raşit SEZER

Kurutma

- Cevher, konsantre ve katkı malzemelerinin içerdikleri suların **uçurulmasıdır** (buradaki su, kristal bağlı değil, serbest sudur).
- Suyun giderildiği maddeler **katı, sıvı veya gaz** olabilir.
- Suyun madde içindeki halleri, **sıvı nem, su buharı veya kimyasal bağlı su** halindedir.
- Kurutma prosesi de bu farklı şartlara göre farklılıklar gösterir.

Suyun buharlaşma ısısının yüksek olması bu işlemin masraflı olmasına neden olur.

Kurutma genellikle soğuk katı maddeleri sıcak hava veya gazlarla temas ettirmek suretiyle yapılır ve suyu uçurulur.

Bazen hava veya gazların içerisindeki rutubetin alınması gerekir.

Havanın rutubeti alındığında bu havaya **kuru hava** denir.

Havanın kurutulmasında en çok kullanılan metot rutubetli havayı **kalsiyum klorür** veya **silika jel** içerisinde geçirmekle yapılır.

Kurutma işlemi neden yapılır?

Pirometalurjik işlemlerde büyük miktarda ısı kaybına yol açan suyu maddenin bünyesinden uzaklaştırmak için,

Birçok metalurjik işlemlerde istenmeyen yan izolasyonların oluşumuna engel olmak için,

Yüksek sıcaklıklarda çalışıldığında fırınlara yapılan şarjın ani hacim büyümelerini ve fırında meydana gelebilecek patlamaları önlemek için,

Kurutulmuş malzemenin bir yerden başka bir yere nakli daha ucuz olduğu için.

Kurutma işlemi genellikle **döner fırınlar da yapılmaktadır.**

Kurutulacak ürün, sıcak hava veya gazlarla imkân nispetinde fazlasıyla temas ettirilmelidir.

Bu sırada harcanan enerji **suyun sıcaklığını yükselterek buhar basıncını arttırdığı gibi suyun buharlaşması için gerekli olan ısıyı da sağlar.**

Ayrıca fırın gazlarının da, su buharı basıncını arttırarak, kondanse olmasına izin vermeden hızla fırından alınması gereklidir.

- Bu nedenle kurutma daima ters akım prensibine göre yapılmaktadır.
- Kurutma işlemine girecek ürünün akış yönü ile kurutmayı yapacak gaz veya havanın akış yönü terstir.



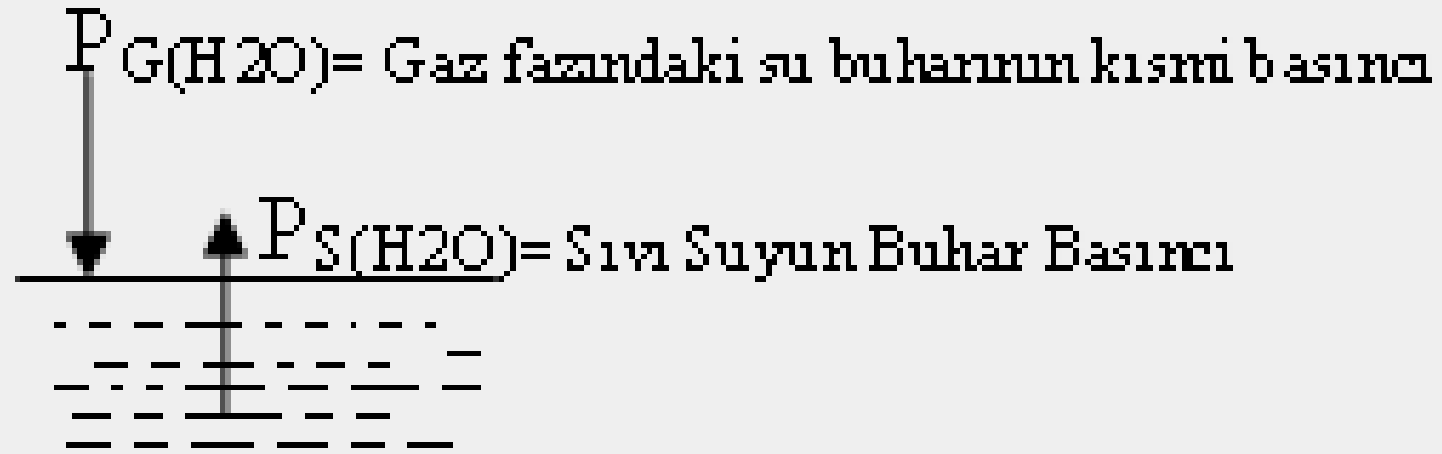
Termodinamik açıdan yaklaşım

Suyun katı maddeden çıkarılması buharlaşma yoluyla sağlanır. Suyun sıvı halden buhar haline geçebilmesi için suyun buhar basıncının çevre atmosferdeki suyun kısmi basıncından yüksek olması gereklidir.

Suyun buharlaşması olayı endotermik olup aşağıdaki reaksiyona göre gerçekleşir.



Bu durum, «**maddeyi kurutma sıcaklığına getirmek için ihtiyaç duyulan ısıya ilave olarak buharlaşma ısısı da verilmeli**» anlamı taşır.



$P_{S(H_2O)} > P_{G(H_2O)}$ ise su buharlaşır,

$P_{S(H_2O)} = P_{G(H_2O)}$ ise denge hali

$P_{S(H_2O)} < P_{G(H_2O)}$ ise yoğunlaşma olur.

Isıyı veren kaynakla buharlaştırılan su taneciklerinin sıcaklıkları arasındaki fark ne kadar fazla olursa birim zamanda buharlaşan su miktarı o kadar fazla olur.

Bu nedenle kurutmada yüksek sıcaklık avantaj sağlar.

Ancak sıcaklığın artmasıyla ısı kayıplarının artması, bazı kimyasal reaksiyonlara engel olma, ergimeyi önleme gibi durumlar nedeniyle sıcaklık sınırlı tutulmaktadır.

- Suyun buhar basıncının sıcaklığa bağlı termodinamik olarak ifadesi aşağıdaki şekildedir;

$$\log P = \frac{\Delta H}{4,575T} + A$$

- P: suyun buhar basıncı,
- T: sıcaklık,
- H: yoğun fazın buharlaşma ısısı,
- A: integral sabiti
- H daima (+) olduğuna göre bu denklem, buhar basıncının mutlak sıcaklık artışı ile eksponansiyel olarak yükseldiğini ifade etmektedir

Serbest ve kimyasal bağı su arasında kesin bir sınır yoktur.

Serbest suyun bir maddeden uzaklaştırılması sırasında önce absorblanmış su ve sırasıyla nispeten gevşek bağı su, ve çok kuvvetle bağı su giderilir.

- Hareketli bir ortamda (mesela hava) çıkarılacak maksimum buhar hacmi, Dalton Kısmi basınçlar kanununa göre;

$$\frac{P_{H_2O}}{P_{Hava}} = \frac{V_{H_2O}}{V_{Hava}}$$

veya

$$V_{H_2O} = V_{Hava} \frac{P_{H_2O}}{P_{Hava}}$$

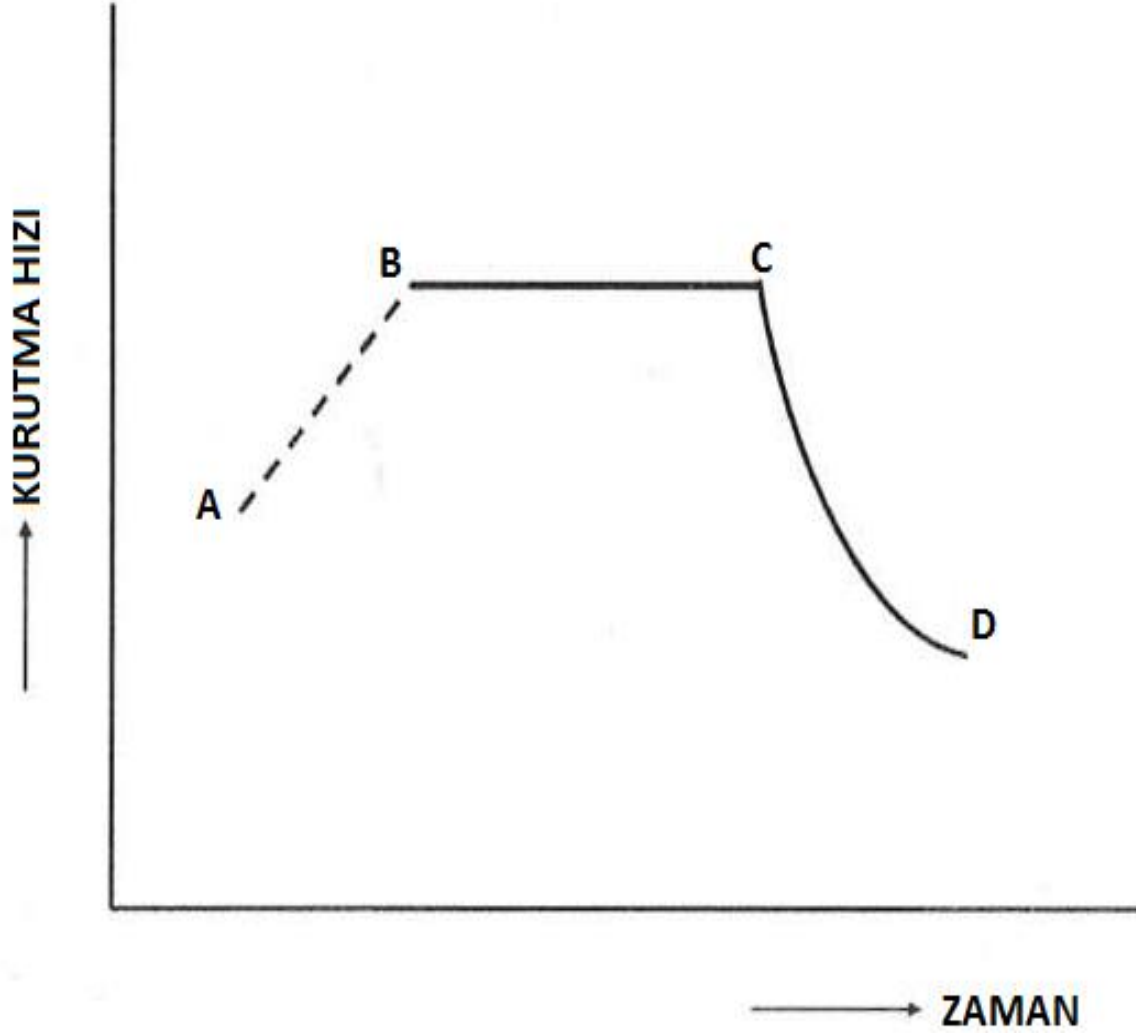
- Eşitliği ile hesaplanabilir.

Kurutma işlemi iki kademedey gerçekleřtirilir.

Birinci kademedey malzemenin yüzeyinde bulunan su buharlaşır.

İkinci kademe ise malzeme içindeki suyun yzeyey gelmesi ile buharlaşmasının gerçekleşmesidir.

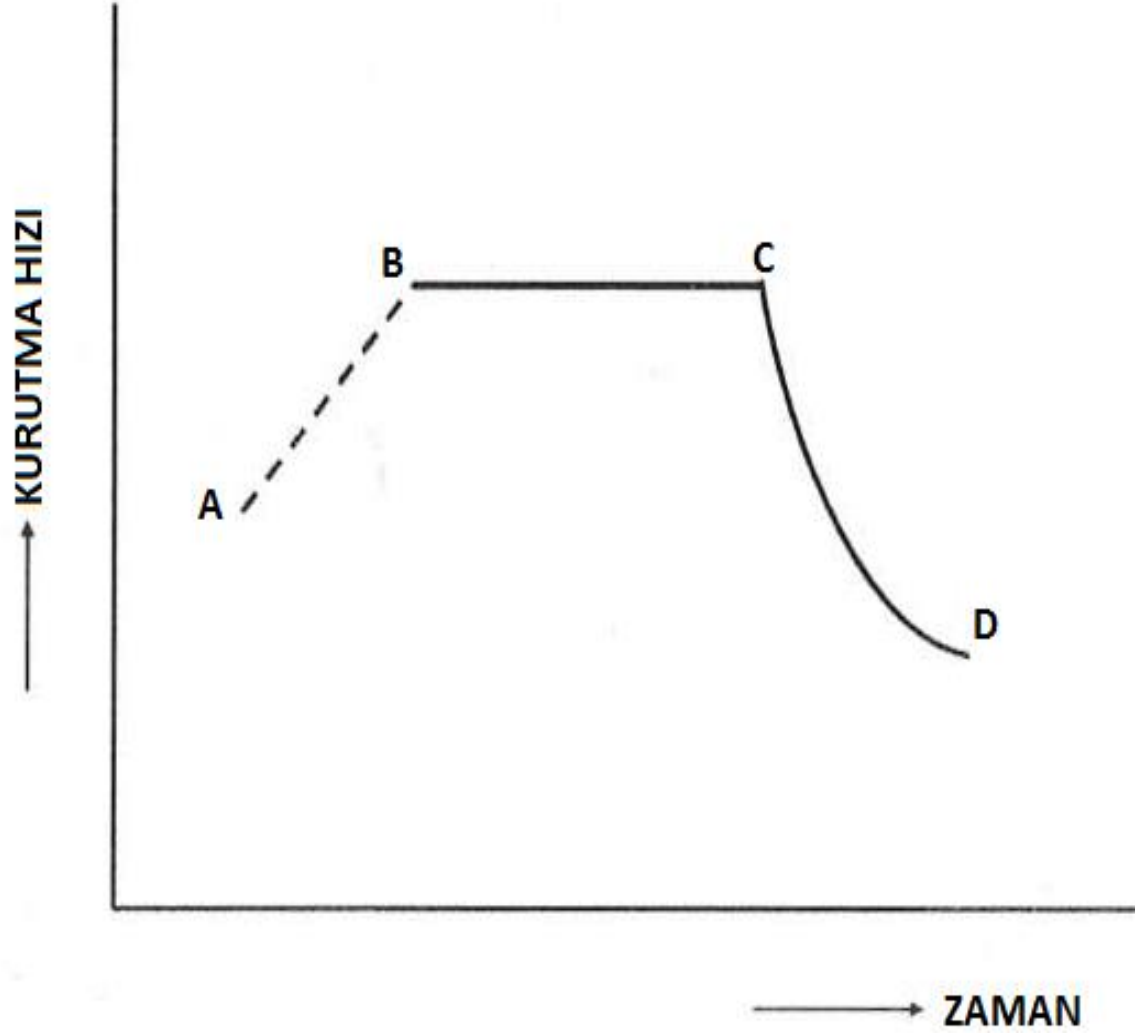
Bu durumda buharlaşma hızı, malzemenin parça boyutuna, fiziksel özelliklerine, su içeriğine vb. bağlıdır.



Noktalı çizgilerle gösterilen A-B arasındaki bölüm, **malzemeye ısı verilmesiyle hemen gerçekleşen ani buharlaşmayı göstermektedir.**

B-C aralığında buharlaşma hızı (**birim zamanda buharlaşan su miktarı**) sabittir ve bu bölge serbest yüzeyden buharlaşmanın olduğu birinci kademeyi gösterir.

Kurutma Hızı- Zaman İlişkisi



C-D eğrisi kurutma hızının zamanla azaldığı ikinci kademeyi gösterir.

Bu kademede, malzeme içindeki su difüzyon yoluyla yüzeye gelerek buharlaşması gerçekleştiğinden, buharlaşma hızı giderek azalmaktadır. Bu nedenle işlem difüzyon ve suyun buharlaşmayla ilgili faktörlerce sınırlanmaktadır.

Kurutma Hızı- Zaman İlişkisi

Birinci kademe için DURGUN bir ortamda buharlaşma hızı formülü :

$$V_1 = k_1 \cdot (P_s - P_g)$$

P_s ; suyun yüzeydeki buhar basıncı,

P_g ; gaz fazdaki su buharının doymuşluk kısmi basıncıdır (su buharının maksimum kısmi basıncına "doymuşluk buhar basıncı" denir).

Bu iki değer birbirine eşit oluncaya kadar buharlaşma devam eder.

$P_s = P_g$ durumu denge halidir ve bu andan itibaren buharlaşma olmaz.

Bu eşitlikteki k , terimi sistemin şartlarına bağlı bir sabittir.

Birinci kademe için **gaz ortamı HAREKETLİ ise**, buharlaşma hızı :

$$V_2 = 0,026 (1+\alpha t) \sqrt{V. (P_s - P_g)}$$

t; kurutma sıcaklığını (°C),

α ; 1/273,

V; gazın hareket hızını (m/sn),

P_s; su buharının yüzeydeki buhar basıncı (mmHg),

P_g; su buharının gaz fazındaki buhar basıncıdır (mmHg).

Böylece buharlaşma hızı ***V₂***, **kg/m².h biriminde hesaplanır.**

$k_2 = 0,026 (1+\alpha t) \sqrt{V}$ olarak alındığında, buharlaşma hızı

$V_2 = k_2 \cdot (P_s - P_g)$ olur.

*Birinci kademenin yani yüzeydeki serbest buharlaşmanın sona ermesi ile gaz hareketi önemini kaybeder ve **ikinci kademe için buharlaşma hızı;***

$V_3 = k_3 \cdot (C - C_{\text{denge}})$ şeklinde ifade edilebilir. Burada,

k_3 ; ampirik olarak deneysel yollarla belirlenmesi gereken sabit,

C ; kurutulmuş maddedeki nem miktarı,

C_{denge} denge su konsantrasyonudur.

Her iki terimin birimi de "**kg**" dır.

Genellikle kurutma işlemlerindeki sıcaklıklarda

$C_{\text{denge}} = 0$ 'dır (yani bütün su buharlaşır) ve bu durumda

$$V_3 = k_3 \cdot C \text{ olur.}$$

V_3 buharlaşma hızının birimi, $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$ 'tir.

Kurutma hızına etki eden faktörler

Kurutma hızı aşağıdaki faktörlerin etkisiyle arttırılabilir:

1.Kurutma sıcaklığının arttırılması:

Özellikle kurutmanın ikinci kademesinde etkilidir. Sıcaklığın arttırılması hem difüzyonu arttırır, hem de havadaki doymuş rutubet miktarını arttırır.

2. Gaz hızının yükseltilmesi:

Kurutmanın sonuna doğru etkisi sıfıra düşer.

3. Kurutma gazının nispi rutubetinin düşürülmesi:

Her sıcaklıkta havanın maksimum doymuş buhar basıncı vardır. Bu basınca göre ne kadar az rutubet içerirse kurutma hızı o kadar artar.

4. Dış basıncın azaltılması:

Bu şekilde çok hızlı bir kurutma sağlanır. Birçok endüstride vakum kurutması başarıyla uygulanmaktadır.

5. Isıtmanın buharlaşma yönünde olması:

Metalurjik işlemlerde genellikle ısıtma buharlaşma yönünde değildir. Sıcak gazlarla ısınan malzeme yüzeyinden içeriye doğru azalan bir sıcaklık dağılımı söz konusudur. Bu sırada az geçirgen yüzeyler oluşacak şekilde ısıtma yapılırsa buharlaşma büyük ölçüde azalır.

Endüstriyel uygulamalarda kurutma genellikle sıcak yanma gazları ya da baca gazlarının kurutulacak maddenin içinden ya da üzerinden geçirilmesiyle yapılır.

Sıcak gaz ya da hava, ya malzeme yüzeyinden ya da içinden geçirilerek hem su buharı oluşturulur, hem de oluşan su buharı sistemden uzaklaştırılır.

Bir çok entegre metalürji tesisinde atık durumunda olan birkaç yüz derece sıcaklıkta, kullanılabilir gazlar vardır. Eğer yoksa ekstra yakıt yakılmalıdır fakat bu yakıtın çok yüksek kalitede olması gerekmez.

Kurutma döner fırında, ya da sabit ya da akışkan yataklı fırınlar gibi farklı tipte bir çok fırında yapılabilir. Kurutma işleminde sıcaklık nispeten düşük olduğu için genellikle ciddi malzeme problemleri yoktur.

Kurutma işlemi genellikle atmosfer basıncına açık sistemlerde yapılır. Su, 100°C'de 1 atm. basınca ulaşır. Bu sıcaklık metalurjik açıdan düşük bir sıcaklık olmasına rağmen, işlem sırasında açık sistemler ve hareketli ortamlar kullanılır.

Yeterince yüksek bir buharlaşma hızı elde etmek için, bununla birlikte toplam atmosfer basıncından daha yüksek buhar basıncına sahip olunması tercih edilir. Bu yüzden kurutma ya atmosferik basınçta ya da düşük basınç altında yapılır.

Atmosferik basınçta kurutulacak madde suyun normal kaynama noktasının üzerine ısıtılır, düşük basınç altında kurutmada ise atmosfer basıncı belli bir sıcaklıkta, suyun buhar basıncının altına çekilir.

Dalton kanunu : Bir gaz karışımının toplam basıncı karışımdaki her bir gazın tek başına ortaya koyduğu basınçların toplamına eşittir.

Nemli bir havanın toplam basıncı = $P_T = P_{H_2O} + P_{KH}$

Toplam hacmi ise = $V_T = V_{H_2O} + V_{KH}$

$$\frac{P_{KH}}{P_{H_2O}} = \frac{n_{KH}}{n_{H_2O}} = \frac{P_{KH}}{P_T - P_{KH}}$$

$$\frac{V_{KH}}{V_{H_2O}} = \frac{n_{KH}}{n_{H_2O}} = \frac{V_{KH}}{V_T - V_{KH}}$$

$$\frac{V_{KH}}{V_{H_2O}} = \frac{P_{KH}}{P_T - P_{KH}}$$

$$V_{H_2O} = \frac{V_{KH}(P_{H_2O})}{(P_T - P_{H_2O})}$$

$$V_{H_2O} = \frac{V_{KH}(P_T - P_{KH})}{P_{H_2O}}$$

Soru 1.

Bir demir cevheri analiz edilmeden önce havada kurutulmaktadır. Bu kurutma sırasında numune %8 oranında ağırlık kaybına uğramaktadır. Havada kurutulmuş numune %4,5 nem, %85,5 Fe_2O_3 , ve %10 SiO_2 bileşiminde olduğuna göre numunenin havada kurutulmadan önceki bileşimi nedir?

Soru 2.

İçinde aşağı doğru yavaşça cevher geçen bir fırında demir cevheri yukarıya doğru çıkan sıcak baca gazlarıyla kurutulmaktadır. Giren gazların miktarı saatte 7200m^3 olup N.Ş. da analizi yanda verilmiştir. Cevher kuru olduğunda içinde %90 Fe_2O_3 , %10 SiO_2 bulunmaktadır. Yaş cevher %18 nemli olup, bunun tamamı kurutucuda çıkarılmaktadır. Cevher 20°C 'de girmekte, 200°C 'de çıkmaktadır. Gazlar 450°C 'de girmekte ve 90°C 'de çıkmakta olup çıkışta 1/4 su buharıyla doyurulmaktadır. Barometre basıncı 740 mmHg'dir. Buna göre 8 saatlik çalışmada kurutulan yaş cevher kaç tondur.

		%
CO_2	=	10,6
O_2	=	6,5
N_2	=	74,8
H_2O	=	8,1

$$P_{\text{H}_2\text{O}_{(90^\circ\text{C})}} = 526\text{mmHg}$$

Soru 3

Ağırlıkça %18 nem içeren bir cevher, dakikada 10 m^3 debi ile gelen %6 nemli hava ile kurutulmaktadır. Gazlar fırını 90°C 'de ve %30 su buharına doymuş olarak terk etmektedir. Barometrik basınç 720 mmHg olduğuna göre bir saatte kurutulabilecek cevher miktarını hesaplayınız.

$$(90^\circ\text{C'de } P_{H_2O_{(90^\circ\text{C})}} = 526 \text{ mmHg})$$

Cevap 1.

$$M_0 = 100 \text{ kg}$$

$$M_1 = 92 \text{ kg}$$

- Fe_2O_3 : $92\text{kg} \cdot 0,855 = 78,66 \text{ kg}$ **%78,66 Fe_2O_3**
- SiO_2 : $92\text{kg} \cdot 0,10 = 9,2\text{kg}$ **%9,2 SiO_2**
- Nem_1 : $92\text{kg} \cdot 0,045 = 4,14\text{kg}$
- Nem_0 : $4,14 + 8 = 12,14\text{kg}$ **%12,14 Nem**

Cevap 2.

8 saatte fırına giren su : $0,081 \cdot 8 \cdot 7.200 = 4.665 \text{m}^3$

fırına giren diğer gazlar: $(8 \cdot 7.200) - 4665 = 52.935 \text{m}^3$

90°C'de çıkan gazlardaki su kısmi basıncı: $\frac{1}{4} \cdot 526 = 131 \text{mmHg}$

$$\begin{aligned}\text{Çıkan gazlardaki su hacmi: } V_{H_2O} &= \frac{P_{H_2O}}{P_{hava}} * V_{hava} \\ &= \frac{131}{740-131} * 52.935 = 11.386 \text{m}^3\end{aligned}$$

Cevherden çıkarılan su: $11.386 - 4.665 = 6.721 \text{m}^3$

$$6.721 \text{m}^3 \text{ hava} = \frac{6.721}{22,4} * 18 = 5.400 \text{kg}$$

Kurutulan cevherin ilk ağırlığı : $5.400 / 0,18 = \mathbf{30.000 \text{kg} = 30 \text{ ton}}$

Cevap 3.

1 saatte fırına giren hava:

$$10^3 \text{m}^3 * 60 = 60\ 000 \text{m}^3$$

1 saatte fırına giren havadaki su:

$$60\ 000 * 0,06 = 3\ 600 \text{m}^3$$

90°C'de çıkan havadaki suyun kısmi basıncı: $526 * 0,3 = 157,8 \text{ mmHg}$

Çıkan gazlardaki su miktarı: $V_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P_{hava}} * V_{hava}$

$$V_{H_2O} = \frac{157,8}{720-157,8} * 60000 = 16\ 840 \text{m}^3$$

Cevherden hava geçen su:

$$16840 - 3600 = 13240 \text{m}^3$$

$$13240 \text{m}^3 * \frac{1}{22,4} * 18 = 10640 \text{kg}$$

Cevher miktarı: $10640 * \frac{1}{0,18} = \mathbf{59105 \text{kg}}$