

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

PHẠM THANH

Giaó trình KỸ THUẬT SÂY 1

Đà Nẵng 2007

LỜI NÓI ĐẦU

Kỹ thuật sấy vật liệu được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực sản xuất và đời sống. Giáo trình " Kỹ thuật sấy 1 " là một trong những giáo trình chuyên môn của chuyên ngành Kỹ thuật nhiệt-Máy lạnh tại trường Đại học Bách khoa Đà Nẵng. Nội dung giáo trình giới thiệu những kiến thức cơ bản về lý thuyết sấy như: các tính chất của vật liệu ẩm, tác nhân sấy, quá trình truyền nhiệt- truyền chất trong vật liệu, động học quá trình sấy và một số phương pháp xác định thời gian sấy.

Những kiến thức trên tạo điều kiện cần thiết và thuận lợi cho việc nghiên cứu tính toán, thiết kế các thiết bị sấy phổ biến trong phần " Kỹ thuật sấy 2".

Giáo trình không chỉ phục vụ cho sinh viên chuyên ngành "Kỹ thuật nhiệt-Máy lạnh", các ngành có liên quan như " Công nghệ chế biến thực phẩm","Máy nông nghiệp -thực phẩm"...mà còn có thể giúp ích cho các kỹ sư, những ai quan tâm đến các kiến thức về lý thuyết sấy.

Mọi ý kiến đóng góp xin gửi về "Bộ môn Sấy-Lạnh và Điều hòa không khí" thuộc khoa Công nghệ Nhiệt điện lạnh trường Đại học Bách khoa Đà Nẵng. Xin chân thành cảm ơn

TÁC GIẢ

Chương 1. VẬT LIỆU ẨM

Vật liệu ẩm (VLA) là những vật có chứa một khối lượng nước và hơi nước. Trong quá trình sấy cần tách một lượng nước nhất định ra khỏi vật. Có thể xem VLA gồm hai thành phần là chất rắn và chất lỏng thấm ướt (gọi là ẩm), phần chất rắn gọi là vật khô tuyệt đối (VKTĐ). Trạng thái ẩm của vật liệu được biểu thị qua độ ẩm tuyệt đối, độ ẩm tương đối (toàn phần), độ ẩm cân bằng, độ chứa ẩm và nồng độ ẩm. Sự liên kết giữa ẩm với vật khô phụ thuộc vào tính chất của chất lỏng, cấu trúc vật và môi trường hình thành liên kết đó.

1.1. CÁC ĐẶC TRƯNG TRẠNG THÁI ẨM CỦA VẬT LIỆU

1.1.1. Độ ẩm tuyệt đối

Độ ẩm tuyệt đối (ω_0) là tỷ số giữa khối lượng ẩm chứa trong vật với khối lượng VKTĐ. Nếu ký hiệu G_a là khối lượng ẩm chứa trong vật liệu, kg và G_k là khối lượng VKTĐ, kg, ta có :

$$\omega_0 = \frac{G_a}{G_k} \cdot 100 \quad (\%) \quad (1-1)$$

Độ ẩm tuyệt đối có giá trị từ 0 đến ∞ . Khi $\omega_0 = 0$, đó là VKTĐ, $\omega_0 = \infty$, có thể coi như vật chứa toàn nước.

1.1.2. Độ ẩm toàn phần

Độ ẩm toàn phần còn gọi là độ ẩm tương đối (ω). Đây là tỷ số giữa khối lượng ẩm chứa trong vật với khối lượng của toàn bộ vật liệu ẩm.

$$\omega = \frac{G_a}{G} \cdot 100 \quad (\%) \quad (1-2)$$

Trong đó G - khối lượng vật liệu ẩm, $G = G_a + G_k$, kg

Độ ẩm toàn phần có giá trị từ 0 đến 100 %. Vật có độ ẩm toàn phần 0 % là VKTĐ và 100 % là vật toàn nước.

Từ các biểu thức trên ta có quan hệ giữa độ ẩm tuyệt đối với độ ẩm toàn phần như sau :

$$\omega_0 = \frac{\omega}{100 - \omega} \cdot 100 \% \quad \text{hay} \quad \omega = \frac{\omega_0}{100 + \omega_0} \cdot 100 \% \quad (1-3)$$

1.1.3. Độ chứa ẩm

Đây là tỷ số giữa lượng ẩm chứa trong vật với lượng VKTĐ, ký hiệu là u .

$$u = \frac{G_a}{G_k}, \text{kg/kg} \quad (1-4)$$

Đại lượng này dùng để biểu thị sự phân bố ẩm trong từng vùng khác nhau hay trong toàn bộ vật. Nếu ẩm phân bố đều trong toàn bộ vật thì giá trị độ chứa ẩm và độ

ẩm tuyệt đối bằng nhau. Vì đơn vị đo khác nhau, mối quan hệ giữa hai đại lượng như sau:

$$\omega_0 = 100 u \text{ , \%} \quad \text{hay } u = \frac{\omega_0}{100} \text{ , kg/kg} \quad (1-5)$$

1.1.4. Nồng độ ẩm

Đây là khối lượng ẩm chứa trong 1 m^3 vật thể, ký hiệu là N .

$$N = \frac{G_a}{V} \text{ , kg/m}^3 \quad (1-6)$$

Ở đây V là thể tích của vật, m^3

1.1.5. Độ ẩm cân bằng

Vật liệu có khả năng trao đổi ẩm với môi trường xung quanh (MTXQ) - hút ẩm hoặc nhả ẩm- để đạt tới trạng thái cân bằng ẩm. Khi ở trạng thái này độ chứa ẩm trong vật là đồng đều và phân áp suất hơi nước (PASHN) trên bề mặt vật bằng PASHN của MTXQ (thường là không khí ẩm). Không còn sự trao đổi ẩm giữa vật với MTXQ, độ ẩm của vật lúc này gọi là độ ẩm cân bằng (ω_{cb}). Giá trị ω_{cb} phụ thuộc vào tính chất của vật liệu, trạng thái MTXQ và có ý nghĩa lớn trong kỹ thuật sấy, trong việc bảo quản vật liệu.

1.2. PHÂN LOẠI VLA VÀ ĐẶC TÍNH XỐP CỦA NÓ

Sự liên kết giữa ẩm với vật phụ thuộc vào tính chất của ẩm và vật liệu. Dựa vào các tính chất vật lý của vật thể, theo A.V.Lựcôp, trong kỹ thuật thường chia VLA thành ba nhóm : vật keo, vật xốp mao dãnh(VXMD) và vật keo xốp mao dãnh(VK-XMD).

1.2.1. Vật keo

Vật keo là vật có tính dẻo với cấu trúc hạt. Phụ thuộc vào trạng thái ẩm, vật sẽ có sự thay đổi về kích thước và hình dạng, thí dụ như keo động vật, đất sét v.v... Để đơn giản cho việc nghiên cứu và tính toán, trong kỹ thuật sấy có thể xem vật keo như là vật xốp mao dãnh có cấu trúc mao quản nhỏ. Khi sấy khô vật bị co ngót nhiều nhưng vẫn giữ được tính dẻo.

1.2.2. Vật xốp mao dãnh (VXMD)

Vật xốp là vật thể bên trong có chứa các khoảng trống rỗng chứa khí. Khi các khoảng trống này thông với nhau, tạo thành các hang có đường kính tương đương rất nhỏ phụ thuộc vào kích thước của vật thì được gọi là mao dãnh (mao quản) và đó là VXMD. Các vật này có khả năng hút mọi chất lỏng dính ướt, không phụ thuộc vào thành phần hóa học của chất lỏng. Sau khi sấy khô vật trở nên giòn và có thể vỡ vụn thành bột, thí dụ như than cùi, các vật liệu xây dựng .. .

1.2.3. Vật keo xốp mao dãnh (VK-XMD)

Đây là những vật vừa có tính dẻo vừa có tính mao dãnh. Về cấu trúc các vật này thuộc loại VXMD nhưng tính chất lại giống các vật keo, có nghĩa là thành mao quản

của chúng có tính dẻo, khi hút ẩm các mao quản trương lên, khi sấy khô thì co lại. Phần lớn VLA thuộc loại này : gỗ, vải, các loại hạt . . .

1.2.4. Đặc tính xốp của VLA

Xốp là đặc tính chung của VLA. Độ xốp là tỷ số giữa tổng tất cả thể tích các hang xốp và các mao quản với thể tích vật của VLA . Nếu ký hiệu độ xốp là ε_v , ta có :

$$\varepsilon_v = \frac{V_x}{V} = \frac{V - V_k}{V} = 1 - \frac{\rho}{\rho_k} \quad (1-7)$$

ở đây: V_x - thể tích của các lỗ xốp, mao quản , m³;

V_k - thể tích của phần vật khô , m³;

V - thể tích của VLA , m³;

ρ, ρ_k - khối lượng riêng của vật xốp, vật khô, kg/m³

Trong VLA các hang xốp, mao quản sẽ chứa đầy nước và hơi nước. Tuỳ theo độ lớn, hình dạng và sự phân bố của các hang xốp mà sự liên kết ẩm, tính chất lan truyền ẩm trong vật sẽ khác nhau. Ngay cả trong các VXMD các đặc tính truyền nhiệt, truyền chất cũng khác nhau giữa các vật có cấu trúc mao dẫn lớn (bán kính mao dẫn lớn hơn 10⁻⁷m) và mao dẫn nhỏ (bán kính mao dẫn nhỏ hơn 10⁻⁷m). Sự phân loại mao dẫn lớn, mao dẫn nhỏ ở đây dựa vào sự khác nhau của quá trình lưu thông các phân tử chất lỏng trong đó. Với điều kiện áp suất khí quyển, quãng đường tự do trung bình của chuyển động các phân tử là 10⁻⁷m, do đó sự lưu thông ẩm sẽ khác nhau trong các mao quản có bán kính lớn hay nhỏ hơn giá trị này.

1.3. ẨM TRONG VẬT LIỆU

1.3.1. Đặc trưng vật lý cơ bản của nước

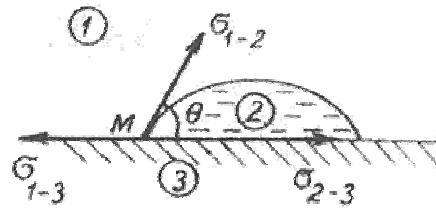
Trong VLA, phần chất lỏng (ẩm) chủ yếu là nước. Phụ thuộc vào quá trình hình thành và môi trường xung quanh nước có thể tồn tại ở ba dạng: rắn, lỏng và hơi. Dưới áp suất khí quyển (760 mm Hg) nước chuyển từ pha rắn sang pha lỏng và ngược lại ở 0°C với nhiệt ẩn nóng chảy là 332,3 kJ/ kg và sôi hay ngưng tụ ở 100 °C với nhiệt ẩn hoá hơi là 2256,3 kJ/ kg. Với áp suất 760 mm Hg, khối lượng riêng của nước ở 0 °C là 916 ÷ 999 kg/ m³, ở 4 °C là 1000 kg/ m³ và ở 100 °C là 958 kg/ m³. Trong quá trình sấy cần cung cấp năng lượng để đưa ẩm từ trong lòng VLA ra ngoài bề mặt và bay hơi vào môi trường xung quanh. Năng lượng tiêu tốn phụ thuộc vào mối liên kết giữa ẩm với vật liệu. Bản chất liên kết này là hiện tượng hấp phụ và hiện tượng mao dẫn.

1.3.2. Quá trình hấp phụ

Hấp phụ giữa nước và vật liệu chia làm hai loại: hấp phụ hoá học và hấp phụ vật lý. Trong quá trình hấp phụ hoá học các phân tử chất lỏng và vật rắn có sự thay đổi thành phần hoặc bị phá huỷ với việc trao đổi điện tử vòng ngoài tức là sự liên kết giữa hai pha là do mối liên kết từng phân tử hay nguyên tử riêng biệt. Hấp phụ hoá học rất bền vững và thông thường trong quá trình sấy liên kết này không bị phá vỡ.

Khác với hấp phụ hóa học, hấp phụ vật lý là hiện tượng liên kết giữa các phân tử của nước với các phân tử của vật hấp phụ không có sự trao đổi ion mà chỉ do sức căng mặt ngoài là lực mao dẫn gây ra. Liên kết hấp phụ vật lý xảy ra không đồng đều theo chiều dày lớp nước. Lực liên kết của lớp chất lỏng càng xa bề mặt vật rắn càng yếu dần, ở sát bề mặt vật rắn tốc độ hấp phụ của lớp phân tử đầu tiên rất lớn. Trên 1 cm^2 bề mặt vật có thể hấp thụ tới 10^{15} phân tử nước. Ban đầu qua trình hấp phụ, lớp chất lỏng bị hấp phụ tập trung tại những vùng hấp phụ mạnh, sau đó lan ra các vùng khác.

Bản chất của hấp phụ vật lý và mao dẫn được mô tả như sau: Giả sử có một giọt dịch thể bám trên bề mặt vật rắn đặt trong pha khí như hình 1.1. Nếu xem hệ gồm pha khí 1, giọt dịch thể 2 và bề mặt vật rắn 3 thì theo nguyên lý 2 nhiệt động học, để đạt được trạng thái cân bằng, thế năng của hệ phải đạt tới trị số nhỏ nhất. Nói cách khác là chất lỏng có xu thế co lại sao cho diện tích tiếp xúc với môi trường là nhỏ nhất.



Hình 1.1. Sức căng bề mặt và góc dính ướt

Góc θ trong hình 1.1 gọi là góc dính ướt. Lực tác dụng qua lại giữa ba pha: rắn, lỏng và khí gọi là sức căng bề mặt σ . Đây chính là thế năng tự do của một đơn vị lớp bề mặt khối lỏng và có trị số bằng lực tác dụng lên một đơn vị độ dài của đường viền bề mặt phân pha. Khi nhiệt độ tăng sức căng bề mặt σ giảm theo quan hệ bậc nhất. Ví dụ đối với nước ta có:

$$\sigma = 0,0757(1 - 0,002 t) \quad , \text{N/m} \quad (1 - 8)$$

Nếu gọi σ_{1-3} , σ_{2-3} , σ_{1-2} tương ứng là sức căng bề mặt giữa pha khí với pha rắn, pha lỏng với pha rắn và pha khí với pha lỏng. Ở trạng thái cân bằng, khi hình dạng giọt lỏng giữ cố định, ta có:

$$\sigma_{1-3} = \sigma_{2-3} + \sigma_{1-2} \cos\theta \quad (1 - 9)$$

$$\text{hay} \quad \cos\theta = \frac{\sigma_{1-3} - \sigma_{2-3}}{\sigma_{1-2}} \quad (1 - 10)$$

Ở đây có thể xảy ra 4 trường hợp:

1) $0 < \cos\theta < 1$ hay $0 < \theta < 90^\circ$. Trong trường hợp này giọt lỏng có xu hướng trải rộng trên bề mặt vật rắn (H1.1 a). Chất lỏng dạng này gọi là chất lỏng dính ướt.

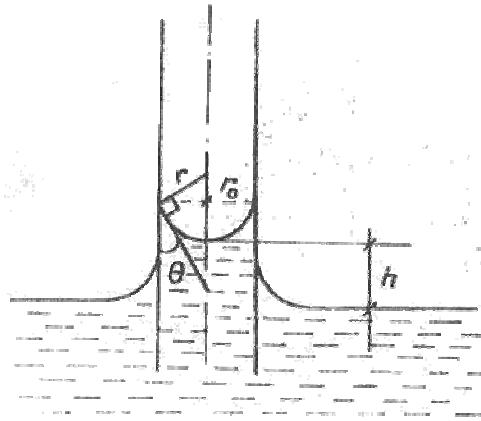
2) $-1 < \cos\theta < 0$ hay $90^\circ < \theta < 180^\circ$. Khi đó giọt lỏng có xu hướng co lại (H1.1b). Chất lỏng dạng này gọi là chất lỏng dính ướt yếu.

3) $\cos\theta = 1$ hay $\theta = 0^\circ$. Chất lỏng dạng này gọi là chất lỏng dính ướt hoàn toàn

4) $\cos\theta = -1$ hay $\theta = 180^\circ$. Đây là chất lỏng hoàn toàn không dính ướt.

1.3.3. Sự hấp phụ trên bề mặt mao dãn

Ống mao dãn hay còn gọi là mao quản là những ống có đường kính tương đương rất nhỏ, hở hai đầu. Nếu nhúng một đầu ống mao dãn vào trong chất lỏng dính ướt thì chất lỏng sẽ dâng lên trong ống mao dãn và bề mặt cột lỏng trong ống sẽ lõm xuống. Nếu chất lỏng thuộc lại không dính ướt thì bề mặt chất lỏng trong ống mao dãn sẽ thấp hơn bên ngoài và bề mặt cột lỏng sẽ lồi lên.



Hình 1.2. Chiêu cao cột lỏng mao dãn.

Tính dính ướt là động lực tạo ra áp suất mao dãn p_σ hay chiều cao cột chất lỏng trong ống mao dãn(H1.2). Gọi p_c là áp suất chất lỏng trên bề mặt cong và p_o là áp suất trên bề mặt phẳng của chất lỏng ta có:

$$p_\sigma = p_c - p_o \quad (1-11)$$

áp suất mao dãn phụ thuộc vào lực liên kết phân tử trong chất lỏng, thể hiện qua sức căng bề mặt và bán kính cong của bề mặt cột lỏng mao dãn.Ta có :

$$p_\sigma = 2\sigma_{2-3} \frac{1}{r} \quad (1-12)$$

với r là bán kính cong của bề mặt chất lỏng trong ống mao dãn, hoặc

$$p_\sigma = \rho \cdot g \cdot h \quad (1-13)$$

với g là gia tốc trọng trường, ρ là khối lượng riêng của chất lỏng và h là chiều cao cột lỏng.

Từ (1-11)và (1-12) ta suy ra:

$$P_c = p_o + 2\sigma_{2-3} \frac{1}{r} \quad (1-14)$$

Như vậy khi mặt cong là lồi thì $\frac{1}{r} > 0$ và $P_c > p_o$ và khi mặt cong lõm $\frac{1}{r} < 0$ và $P_c < p_o$.

Có nghĩa là áp suất mao dãn của mặt lồi có giá trị dương, của mặt cong lõm có giá trị âm còn của mặt phẳng bằng không.

Trong hình 1.2, h là chiều cao cột lỏng trong ống mao dẫn, r_0 là bán kính mao dẫn, r là bán kính cong của bề mặt cột lỏng mao dẫn. Khi cân bằng lực thì trọng lượng cột lỏng sẽ cân bằng với sức căng bề mặt tác dụng theo chu vi mao dẫn với bán kính r_0 . Ta có biểu thức:

$$\pi r_0^2 h \rho g = 2\pi r_0 \sigma \cos\theta \quad (1-15)$$

Từ đây ta tính được chiều cao cột lỏng:

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{r_0 \rho g} \quad (1-16)$$

Trong hình vẽ ta có thể thấy, bán kính cong của bề mặt cột lỏng r bằng:

$$r = \frac{r_0}{\cos\theta} \quad (1-17)$$

$$\text{Kết hợp hai biểu thức trên ta có : } h = \frac{2\sigma}{r \rho g} \quad (1-18)$$

1.4. CÁC DẠNG LIÊN KẾT VÀ NĂNG LƯỢNG LIÊN KẾT ẨM

1.4.1. Liên kết hóa học

Liên kết hóa học giữa ẩm và vật khô rất bền vững trong đó các phân tử nước đã trở thành một bộ phận trong thành phần hóa học của phân tử vật ẩm. Năng lượng liên kết ẩm hóa học hình thành nhờ lực tác dụng của các ion hydroxin hoặc nhờ mối liên kết tinh thể ngâm nước và có giá trị lớn nhất so với các dạng liên kết ẩm khác. Ẩm liên kết hóa học chỉ có thể tách ra khi có phản ứng hóa học và thường phải nung nóng vật đến nhiệt độ cao, dẫn đến sự thay đổi tính chất hóa lý của vật. Có thể xác định năng lượng tự do của nước liên kết hóa học và nhiệt lượng cần thiết để phá vỡ mối liên kết đó dựa vào áp suất thuỷ phân theo nhiệt độ, ví dụ, đối với tinh thể sunfat đồng ngâm nước $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ở nhiệt độ 25°C ứng với $p_b = 3200 \text{ N/m}^2$, áp suất của hơi nước liên kết là $p_u = 110 \text{ N/m}^2$, năng lượng liên kết ẩm hóa học là $1 = 8,4 \cdot 10^3 \text{ J/mol}$. Trong quá trình sấy ẩm liên kết hóa học không bị tách ra.

1.4.2. Liên kết hấp phụ(LKHP)

LKHP được xem là liên kết của một lớp cõi phân tử trên bề mặt các hang xốp của vật liệu. Người ta xem nước hoặc hơi nước liên kết với vật liệu như một hệ liên kết cơ lý đẳng nhiệt. Gọi p_b là phân áp suất bão hòa của hơi nước tự do ứng với nhiệt độ T và p_u là phân áp suất cân bằng của hơi nước trên bề mặt vật liệu có độ chứa ẩm u thì năng lượng LKHP(năng lượng cần thiết để phá vỡ liên kết đó của nước) có thể xem bằng công tham gia trong quá trình đẳng nhiệt để đưa hơi nước từ áp suất p_u đến áp suất p_b . Nếu cho rằng hơi nước là khí lý tưởng thì công đó sẽ là:

$$1 = RT \ln \frac{p_b}{p_u} = - RT \ln \varphi \quad (1-19)$$

trong đó: R là hằng số khí của hơi nước $= 462 \text{ J / kg.K}$ và $\varphi = \frac{p_u}{p_b}$.

Năng lượng liên kết ẩm cũng có thể được biểu diễn qua hiệu ứng nhiệt liên kết, tức là hiệu số giữa nhiệt lượng cần thiết để làm bay hơi ẩm lỏng liên kết và ẩm lỏng tự do. Nếu ký hiệu r_u là nhiệt ẩn hoá hơi của nước liên kết trong vật có độ chứa ẩm u và r_b là nhiệt ẩn hoá hơi của nước tự do thì nhiệt lượng cần thiết để tách ẩm LKHP bằng:

$$q = \Delta r = r_u - r_b \quad (1-20)$$

Với hệ đẳng nhiệt ta có:

$$Q = l = RT \ln \frac{p_b}{p_u} \quad (1-21)$$

1.4.3. Liên kết mao dẫn (LKMD)

LKMD là liên kết chủ yếu trong vật VLA. Lực liên kết ở đây là lực mao dẫn do sức căng bề mặt của chất lỏng dính ướt, thể hiện qua công thức(1-12). Trường hợp ẩm LKMD thì năng lượng liên kết ẩm l được tính phụ thuộc vào bán kính của mặt cong cột lỏng trong mao dẫn r và tính chất của chất lỏng.

$$l = v \frac{2\sigma}{r} \quad (1-22)$$

ở đây v là thể tích riêng của chất lỏng.

1.4.4. Liên kết thẩm thấu (LKTT)

LKTT điển hình là liên kết của nước trong các dung dịch. Nếu p_u là phân áp suất hơi nước trên bề mặt dung dịch và p_b là phân áp suất bão hòa của hơi nước trên bề mặt nước tự do thì năng lượng LKTT có thể được tính :

$$l = -RT \ln \frac{p_u}{p_b} = -RT \ln \varphi \quad (1-23)$$

Không kể liên kết hoá học, khi so sánh 3 loại liên kết ẩm: LKHP, LKMD và LKTT thì năng lượng LKMD là lớn nhất và bé nhất là năng lượng LKTT. Vì vậy, trong quá trình sấy các vật có LKMD cần tiêu tốn năng lượng nhiều hơn.

Phương pháp thường dùng để xác định năng lượng liên kết ẩm là phương pháp thực nghiệm. Đơn giản nhất là dùng nguồn điện để cung cấp nhiệt cho vật sau khi giữ nhiệt độ của vật không đổi và bằng với môi trường xung quanh. Dựa vào công suất điện tiêu thụ ta sẽ xác định lượng nhiệt dùng để làm bay hơi ẩm chính là năng lượng có giá trị bằng năng lượng liên kết ẩm. Để xác định chính xác năng lượng liên kết ẩm và tính chất các loại liên kết ẩm trong quá trình sấy cần kết hợp phương pháp thực nghiệm với việc phân tích đặc tính trao đổi nhiệt ẩm của vật với môi trường xung quanh.

1.5. CÁC ĐẶC TRƯNG NHIỆT ĐỘNG CỦA VLA

1.5.1. Thế truyền ẩm (TTA)

Trong nhiều công trình nghiên cứu người ta xem quá trình truyền nhiệt và truyền chất(cụ thể là truyền ẩm) đồng dạng nhau. Khái niệm TTA dựa trên cơ sở sự tương tự nhiệt động của hai quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm. Khái niệm “ẩm”, “khô” trong truyền ẩm tương tự như khái niệm “nóng”, “lạnh” trong truyền nhiệt. Để đo độ

“ẩm”, “khô” của vật, người ta chọn một đại lượng tương tự về mặt nhiệt động như nhiệt độ và gọi là thế truyền ẩm, ký hiệu là θ . Trong trường hợp dẫn ẩm đẳng nhiệt có thể xem TTA θ là một hàm của độ chứa ẩm u : $\theta = f(u)$. Để tính toán quá trình truyền ẩm trong vật liệu Viện sĩ A.C. Lư-côv chọn một vật mẫu làm chuẩn (giấy lọc), sau đó cho vật liệu ẩm tiếp xúc với nó cho đến khi đạt trạng thái cân bằng ẩm giữa hai vật rồi xác định hàm ẩm và tính thế truyền ẩm.

Đối với vật mẫu Lư-côv lấy $\frac{1}{100}$ giá trị độ chứa ẩm cực đại u_{max} và gọi là một độ truyền chất, ký hiệu 0M . Như vậy TTA của vật mẫu được tính:

$$\theta = \frac{u}{u_{max}} \cdot 100 , {}^0M \quad (1-24)$$

Khi giấy lọc khô tuyệt đối, $TTA = 0 {}^0M$, còn khi giấy lọc có độ chứa ẩm hấp phụ cực đại $u_{hpcd} = 0,277 \text{ kg/kg}$ ở nhiệt độ $25 {}^\circ C$ thì $TTA = 100 {}^0M$. Nếu giấy lọc có độ chứa ẩm $u = 0,5 \text{ kg/kg}$ thì TTA tương ứng sẽ là:

$$\theta = \frac{0,5}{0,277} \cdot 100 = 180 {}^0M$$

Và khi vật liệu ẩm tiếp xúc với giấy lọc, đạt trạng thái cân bằng ẩm tương ứng thì TTA của nó cũng là $180 {}^0M$

Giá trị TTA của vật liệu còn phụ thuộc vào độ ẩm môi trường xung quanh. Các thực nghiệm đã có công thức xác định TTA trong vật liệu ở môi trường khí:

$$- \varphi = 0 \div 0,19 \quad \text{thì} \quad \theta = \frac{23,9\varphi}{0,1465 + \varphi} \quad (1-25)$$

$$- 0,19 \leq \varphi \leq 1,0 \quad \text{thì} \quad \frac{1}{\theta} = 0,013 - 0,0362 \ln \varphi \quad (1-26)$$

1.5.2. Ẩm dung riêng

Tương tự như khái niệm nhiệt dung riêng ở truyền nhiệt, trong truyền ẩm người ta có đại lượng gọi là ẩm dung riêng C_a và được tính như:

$$C_a = \left(\frac{\partial u}{\partial \theta} \right)_T \quad (1-27)$$

trong đó: ∂u - lượng ẩm trao đổi trong quá trình truyền ẩm

$\partial \theta$ - sự thay đổi khả năng trao đổi ẩm của vật

khi đó độ chứa ẩm có thể tính:

$$u = \int_0^\theta C_a d\theta \quad (1-28)$$

Tương tự như nhiệt dung riêng, khi xem ẩm dung riêng không phụ thuộc TTA ta có :

$$u = C_a \theta \quad (1-29)$$

Để đo nhiệt độ theo thang bách phân, người ta lấy nước làm vật mẫu với nhiệt độ nước đá đang tan là 0°C và nhiệt độ nước đang sôi là 100°C ở cùng áp suất 760 mmHg. Tương tự, để xây dựng thang đo TTA người ta lấy xuenluilo (giấy lọc) làm vật mẫu. Khi xuenluilo khô tuyệt đối, $\text{TDA} = 0^{\circ}\text{M}$, còn khi xuenluilo có độ chứa ẩm hấp phụ cực đại $u_{\text{hpcd}} = 0,277 \text{ kg/kg}$ ở nhiệt độ 25°C thì $\text{TDA} = 100^{\circ}\text{M}$. Như vậy ẩm dung riêng của nó sẽ là:

$$C_a = \frac{u_{\text{hpcd}}}{100} = \frac{0,277}{100} = 0,00277 \text{ kg/kg } {}^{\circ}\text{M} \quad (1-30)$$

Cũng như nhiệt dung riêng, ẩm dung riêng được xác định bằng thực nghiệm. Giá trị ẩm dung riêng của một số VLA như sau:

Bảng 1.1. Ẩm dung riêng trung bình của một số VLA

VLA	$t \text{ } {}^{\circ}\text{C}$	$\theta \text{ } {}^{\circ}\text{M}$	$\omega_0, \%$	$C_a \cdot 10^2, \text{kg/kg } {}^{\circ}\text{M}$
1.Cát thạch anh	25	100 \div 300	0,8 \div 2,0	0,007
2.Gỗ thông	40 \div 65	200 \div 700	130 \div 230	0,21
3.Cao lanh	25 \div 70	80 \div 250	35 \div 50	0,10
4.Keo động vật	25	70 \div 100	40 \div 60	0,70
5.Lúa	25	12,5 \div 100	7 \div 30	0,365

1.5.3. Hệ số gradien nhiệt độ

Hệ số gradien nhiệt độ của VLA là tỷ số của lượng chênh lệch độ chứa ẩm với lượng chênh lệch nhiệt độ khi không có sự truyền ẩm ($j=0$), được ký hiệu δ :

$$\delta = \left(\frac{\Delta u}{\Delta T} \right)_{j=0}, \text{ } 1/\text{ } {}^{\circ}\text{K} \quad (1-31)$$

Hệ số gradien nhiệt độ δ cho biết sự thay đổi độ chứa ẩm của vật liệu khi có sự thay đổi nhiệt độ của nó.

1.5.4. Hệ số dẫn thế truyền ẩm

Như đã biết, trong truyền nhiệt ta coi nhiệt độ t là thế truyền nhiệt, còn hệ số dẫn nhiệt độ a là hệ số dẫn thế truyền nhiệt. Tương tự, trong truyền ẩm (truyền chất) ta có độ chứa ẩm u là thế truyền và a_m gọi là hệ số dẫn thế truyền ẩm. Đại lượng này đặc trưng cho tốc độ biến đổi thế truyền ẩm của vật liệu và bằng thực nghiệm, có thể xác định như sau:

$$a_m = \frac{\pi}{\tau} \left[\frac{m}{2(u_0 - u_\delta)\rho_0} \right]^2, \text{ } \text{m}^2/\text{s} \quad (1-32)$$

với : m - lượng ẩm truyền qua một đơn vị diện tích bề mặt tiếp xúc giữa VLA và vật liệu chuẩn

τ - thời gian tiếp xúc

u_0 - độ chứa ẩm ban đầu của VLA

u_s - độ chứa ẩm của vật mẫu

ρ_0 - khối lượng riêng của vật liệu khô tuyệt đối

1.5.5. Hệ số dẫn ẩm

Cũng như quá trình truyền nhiệt, trong quá trình truyền ẩm ta có hệ số dẫn ẩm λ_a

như sau:

$$\lambda_a = a_m \cdot C_a \cdot \rho_0 , \quad \text{kg / m.h}^0 \text{M} \quad (1-33)$$

với : a_m - hệ số dẫn thế truyền ẩm

C_a - ẩm dung riêng

ρ_0 - khối lượng riêng của vật liệu khô tuyệt đối

1.6.CÁC ĐẶC TRƯNG NHIỆT VẬT LÝ CỦA VLA

1.6.1. Nhiệt dung riêng (NDR)

Nhiệt dung riêng của VLA được xác định từ NDR của vật khô tuyệt đối và của ẩm chứa trong vật.

$$C = \frac{C_K G_K + C_a G_a}{G_K + G_a} = \frac{C_K G_K + C_a G_a}{G} \quad (1-34)$$

$$\text{hay } C = \frac{C_K (100 - \omega) + C_a \omega}{100} \quad (1-35)$$

$$\text{hoặc } C = C_K + \frac{C_a - C_K}{100} \omega \quad (1-36)$$

Trong các công thức trên C_K, C_a -NDR của vật khô và ẩm; G_K, G_a - khối lượng của vật khô và ẩm; ω - độ ẩm tương đối của VLA.

Nếu tính NDR của VLA theo khối lượng vật khô tuyệt đối ta có đại lượng nhiệt dung riêng dẫn xuất C_{dx} (còn gọi là NDR qui dẫn) được tính theo NDR vật khô, độ ẩm tuyệt đối ω_0 hay độ chứa ẩm u :

$$C_{dx} = C_K + C_a \frac{\omega_0}{100} = C_K + C_a u \quad (1-37)$$

Trong các công thức trên ta thấy NDR của VLA phụ thuộc tuyến tính với độ ẩm. Nhưng theo kết quả nghiên cứu cho thấy nó không tuân thủ quy luật này và còn phụ thuộc vào nhiệt độ. Nguyên nhân là do khi độ ẩm và nhiệt độ thay đổi, tính chất hóa lý của vật khô có thay đổi, đồng thời tỷ lệ giữa ẩm lỏng, hơi ẩm và không khí trong các hang xốp cũng thay đổi.

1.6.2. Hệ số dẫn nhiệt (HSDN)

Trong VLA quá trình truyền nhiệt được thực hiện dưới các dạng sau:

- Sự dẫn nhiệt của bản thân vật liệu khô;
- Sự dẫn nhiệt và đối lưu của ẩm lỏng, hơi ẩm với không khí trong các hang xốp;
- Sự bức xạ giữa các bề mặt của các hang xốp;
- Sự luân chuyển của lượng ẩm trong lòng vật.

Vì thế HSDN của VLA phải xét tới tất cả các yếu tố trên và được xác định theo công thức sau:

$$\lambda = \lambda_k + \lambda_a + \lambda_{KK} + \lambda_{bx} + \lambda_u \quad (1-38)$$

trong đó: λ_k - HSDN của vật liệu khô tuyệt đối;

λ_a, λ_{KK} - HSDN tương đương do truyền nhiệt đối lưu của ẩm và không khí;

λ_{bx} - HSDN tương đương xét đến ảnh hưởng của trao đổi nhiệt bức xạ giữa các bề mặt hang xốp;

λ_u - HSDN tương đương xét đến quá trình truyền ẩm trong vật.

Qua phân tích trên cùng với kết quả nhiều công trình nghiên cứu cho thấy HSDN của VLA phụ thuộc độ xốp, độ ẩm và tính chất các quá trình làm nóng hoặc làm nguội vật liệu.

1.6.3. Hệ số dẫn nhiệt độ (HSD ND)

HSD ND là một trong những đại lượng quan trọng đặc trưng cho quán tính nhiệt của vật thể. Khi biết hệ số dẫn nhiệt, nhiệt dung riêng và khối lượng riêng của vật liệu thì HSD ND được xác định theo công thức sau:

$$a = \frac{\lambda}{C\rho} \quad (1-39)$$

Vật có giá trị a càng lớn thì quá trình gia nhiệt hoặc làm nguội vật càng nhanh. Tích số $C.\rho$ là nhiệt dung riêng thể tích của vật thể, cho biết khả năng tích nhiệt của vật. Từ (1-34) cho thấy khi cùng λ nếu $C.\rho$ càng lớn thì a càng nhỏ, có nghĩa là vật có khả năng trữ nhiệt càng lớn thì quá trình gia nhiệt và làm nguội càng chậm.

Chương 2. TÁC NHÂN SẤY

Tác nhân sấy (TNS) là những chất dùng để đưa lượng ẩm tách ra từ vật sấy ra khỏi thiết bị sấy(TBS). Trong quá trình sấy, môi trường bao quanh vật sấy luôn được bổ sung ẩm thoát ra từ vật sấy. Điều này sẽ làm cản trở sự bay hơi ẩm từ vật sấy. Trong nhiều trường hợp TNS còn đóng vai trò cung cấp nhiệt cho vật sấy để hoá hơi ẩm lỏng. Trong các TBS tiếp xúc, bức xạ... TNS chỉ đóng vai trò vận chuyển ẩm, còn nguồn nhiệt có thể là bề mặt đốt nóng, nguồn bức xạ Ở các TBS đổi lưu thì TNS vừa làm nhiệm vụ cung cấp nhiệt cho vật sấy vừa làm nhiệm vụ tải ẩm. TNS thường là các chất khí như: không khí, khói, hơi quá nhiệt. Chất lỏng cũng được sử dụng làm TNS như các loại dầu, một số loại muối nóng chảy v.v.... Trong chương này chúng ta chỉ xem xét hai loại TNS thông dụng là không khí và khói.

2.1. KHÔNG KHÍ ẨM (KKA)

2.1.1. Khái niệm chung

Không khí là loại TNS có sẵn trong tự nhiên, không độc hại và không làm biến sản phẩm sấy. Không khí có chứa hơi nước gọi là không khí ẩm và được coi là hỗn hợp khí lý tưởng của hai thành phần: không khí khô (KKK) và hơi nước. Vì vậy KKA cũng tuân theo các định luật của hỗn hợp khí lý tưởng:

- Khối lượng của KKA (G) bằng tổng khối lượng của KKK (G_K) và hơi nước (G_h)

$$G = G_K + G_h \quad (2-1)$$

- KKK và hơi nước cũng phân bố đều trong toàn bộ thể tích:

$$V = V_K = V_h \quad (2-2)$$

- Nhiệt độ của KKK và hơi nước bằng nhau và chính là nhiệt độ của KKA :

$$t = t_K = t_h \quad (2-3)$$

- Áp suất của KKA bằng tổng phân áp suất của KKK và phân áp suất của hơi nước:

$$p = p_K + p_h \quad (2-4)$$

Tùy theo trạng thái của hơi nước trong KKA ta có 3 loại:

1.KKA chưa bão hòa. Đây là loại KKA mà lượng hơi nước chứa trong đó chưa đạt mức tối đa và nó còn có thể nhận thêm hơi nước. Trạng thái của hơi nước trong KKA chưa bão hòa là hơi quá nhiệt. Phân áp suất hơi nước trong KKA chưa bão hòa nhỏ hơn áp suất bão hòa của hơi nước ứng với nhiệt độ của KKA, $p_h < p_{hs}$.

2.KKA bão hòa. Đây là loại KKA mà lượng hơi nước chứa trong đó ở mức tối đa $G_h = G_{hmax}$. Trạng thái của hơi nước là hơi bão hòa khô và phân áp suất của hơi nước bằng áp suất bão hòa của hơi nước ứng với nhiệt độ KKA, $p_h = p_{hs}$.

3.KKA quá bão hoà. Đây là loại KKA mà lượng hơi nước chứa trong đó ở mức tối đa và còn chứa thêm cả nước ngưng tụ. Trạng thái của hơi nước ở đây là hơi bão hoà ẩm.

2.1.2. Các thông số đặc trưng của KKA

2.1.2.1. Độ ẩm tuyệt đối

Độ ẩm tuyệt đối ρ_h của KKA là khối lượng của hơi nước có trong 1 m³ KKA, (kg/m³ KKA).

2.1.2.2. Độ ẩm tương đối

Độ ẩm tương đối φ của KKA là tỷ số giữa lượng hơi nước chứa trong KKA với lượng hơi nước lớn nhất có thể chứa trong KKA đó ở cùng một nhiệt độ và đo bằng %. Như vậy:

$$\varphi = \frac{G_h}{G_{h\max}} 100 , \% \quad (2-5)$$

Từ các phương trình trạng thái ta có thể tính được G_h , $G_{h\max}$ và tính:

$$\varphi = \frac{p_h V / R_h T}{p_{hs} V / R_h T} 100 = \frac{p_h}{p_{hs}} 100 , \% \quad (2-6)$$

Khi $\varphi = 0$ ta có không khí khô. Khi φ tăng lên thì phân áp suất hơi nước trong KKA cũng tăng và khi $\varphi = 100\%$ thì không khí ẩm trở nên bão hoà. Lúc đó phân áp suất hơi nước bằng áp suất bão hoà của hơi nước ứng với nhiệt độ KKA.

2.1.2.3. Độ chứa ẩm

Độ chứa ẩm của KKA là khối lượng hơi nước chứa trong 1 kg không khí khô:

$$d = G_h / G_K , \text{ kg/kg KKA} \quad (2-7)$$

Từ phương trình trạng thái ta có thể tính G_h , G_K và xác định :

$$d = \frac{p_h}{p_K} \frac{R_K}{R_h} \quad (2-8)$$

với $R_h = 8314/18$ [J/kgK] và $R_K = 8314/29$ [J/kgK] ta có:

$$d = 0,622 \frac{p_h}{p_K} = 0,622 \frac{p_h}{p - p_h} . \quad (2-9)$$

Khi thay $P_h = \varphi p_{hs}$ ta có :

$$d = 0,622 \frac{\varphi p_{hs}}{p - \varphi p_{hs}} . \quad (2-10)$$

Trong trường hợp KKA có nhiệt độ $t > 100^{\circ}\text{C}$ thì phân áp suất cực đại của hơi nước sẽ không đổi và bằng áp suất của KKA. Lúc đó $p_{hs} = p$ và cho rằng áp suất của KKA bằng áp suất khí quyển là 1 bar, ta có:

$$d = 0,622 \frac{\varphi}{1 - \varphi} \quad (2-11)$$

Từ đây ta thấy rằng khi $d = \text{const}$ thì $\varphi = \text{const}$.

Độ chứa ẩm của KKA sẽ có giá trị cực đại khi không khí ở trạng thái bão hòa, $\varphi = 100\%$:

$$d_{max} = 0,622 \frac{p_{hs}}{p - p_{hs}} \quad (2-12)$$

Áp suất bão hòa của hơi nước có thể xác định theo nhiệt độ hoặc từ công thức trên ta có:

$$p_{hs} = \frac{pd_{max}}{0,622 + d_{max}} \quad (2-13)$$

Phân áp suất hơi nước cũng được xác định tương tự khi biết được độ chứa ẩm:

$$p_h = \frac{pd}{0,622 + d} \quad (2-14)$$

2.1.2.4.Nhiệt dung riêng

Được coi như hỗn hợp khí lý tưởng nên với KKA nhiệt dung riêng có thể tính như sau:

$$C = \frac{C_K + dC_h}{1 + d}, \text{ kJ/kgK} \quad (2-15)$$

với $C_K \approx 1 \text{ kJ/kgK}$ -là nhiệt dung riêng của không khí khô, $C_h \approx 1,84 \text{ kJ/kgK}$ là nhiệt dung riêng của hơi nước, d -là độ chứa ẩm,kg.

2.1.2.5.Entanpi

Entanpi của KKA bằng tổng entanpi của KKK và entanpi của hơi nước:

$$I = C_K t + d(r + C_h t), \text{ kJ/kg KKK} \quad (2-16)$$

Với C_K, C_h như trên và $r = 2500 \text{ kJ/kg}$ là nhiệt ẩn hoá hơi của hơi nước ta có:

$$I = t + d(2500 + 1,84 t), \text{ kJ/kg KKK} \quad (2-17)$$

2.1.2.6.Nhiệt độ đọng sương t_{ds}

Nhiệt độ đọng sương chính là nhiệt độ bão hòa ứng với phân áp suất hơi nước trong KKA. Khi phân áp suất hơi nước càng cao (độ chứa ẩm d càng lớn) thì nhiệt độ đọng sương của KKA càng lớn. Đại lượng này được xác định bằng hyđrômét.

2.1.2.7.Nhiệt độ nhiệt kế ướt t_u

Đây là nhiệt độ của nước bay hơi vào không khí hay còn gọi là nhiệt độ bão hòa đoạn nhiệt. Nếu ta xét quá trình bay hơi của nước vào không khí trong điều kiện đoạn nhiệt thì nhiệt lượng cần thiết để nước bay hơi lấy ngay từ không khí. Vì vậy lớp không khí ở bề mặt bay hơi mất đi một lượng nhiệt chính bằng lượng nhiệt để nước bay hơi, nên nhiệt độ của nó sẽ giảm và nhỏ hơn so với nhiệt độ của không khí ở xa bề mặt bay hơi. Nhiệt độ lớp không khí sát ngay bề mặt bay hơi gọi là nhiệt độ nhiệt kế ướt t_u . Nhiệt độ này được xác định bằng nhiệt kế có bầu thuỷ ngân hoặc bầu rượu có bọc một lớp bông luôn thấm nước.

Hiệu số giữa nhiệt độ của không khí với nhiệt độ nhiệt kế ướt đặc trưng cho khả năng hút ẩm của không khí còn được gọi là thế sấy (động lực của quá trình bay hơi)

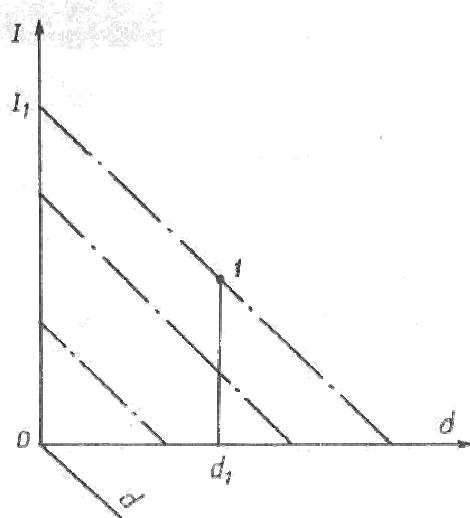
$$\Delta t = t - t_u \quad (2-18)$$

Khi $\Delta t = 0$, không khí ở trạng thái bão hòa ẩm, $\varphi = 100\%$ thì nước không thể bay hơi vào không khí (Trường hợp đặc biệt nếu nhiệt độ của nước lớn hơn nhiệt độ không khí thì nước bay hơi vào không khí và ở dạng sương mù, không khí trở nên quá bão hòa). Khi Δt càng lớn thì độ ẩm tương đối φ của nó càng nhỏ, không khí càng khô nên khả năng nhận thêm hơi nước càng nhiều.

2.1.3. Đồ thị I-d của KKA

2.1.3.1. Đặc điểm

Các thông số của KKA, ngoài phương pháp giải tích như trên còn có thể xác định theo phương pháp đồ thị. Trong thực tế thuận tiện nhất là dùng đồ thị I-d, trên đó biểu diễn các quá trình thay đổi trạng thái của không khí ẩm rất đơn giản và rõ ràng. Trong kỹ thuật sấy, đồ thị I-d rất quan trọng, nó được sử dụng để tính toán quá trình sấy: xác định các tiêu hao không khí, tiêu hao nhiệt, các thông số của KKA và biểu diễn quá trình sấy lý thuyết, quá trình sấy thực tế . . .

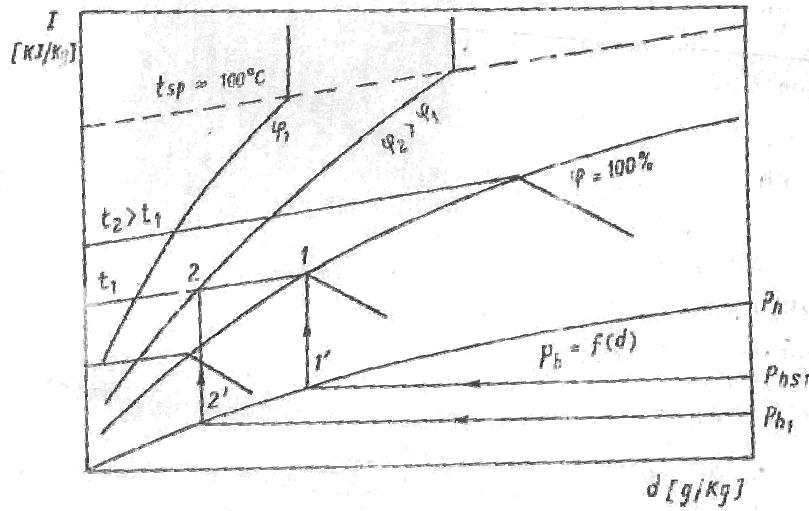


Hình 2.1. Hệ trực toạ độ của đồ thị I-d

Đồ thị I-d lần đầu tiên được Ramzyn- nhà khoa học người Nga- trình bày vào năm 1918. Sau đó một nhà khoa học người Đức là Molier cũng công bố đồ thị tương tự vào năm 1923. Đồ thị I-d được thành lập với hai trục toạ độ I và d hợp với nhau một góc 135^0 (hình 2.1). Để tiện quan sát người ta vẽ trục d vuông góc với trục I. Các đường $d = \text{const}$ là những đường thẳng đứng còn các đường $I = \text{const}$ là những đường thẳng hợp với trục tung (trục I) một góc 135^0 .

Đồ thị I-d được vẽ với một áp suất nhất định của KKA. Trong các tài liệu của Nga thì áp suất khí trời $p = 745 \text{ mmHg}$, còn trong các tài liệu của Anh-Mỹ thì $p = 760 \text{ mmHg}$. Chúng ta có thể sử dụng các đồ thị này cho các áp suất khí trời khác nhau, khi yêu cầu chính xác thì cần phải làm phép qui đổi.

2.1.3.2.Cách thành lập đồ thị I-d



Hình 2.2. Cách xây dựng đồ thị I-d

Trên đồ thị I-d giá trị entanpi được tính bằng kJ/kg KKK hay kcalo/kg KKK, còn độ chứa ẩm d tính bằng kg/kg KKK hoặc g/kg KKK; phân áp suất hơi nước p_h tính bằng mmHg.

a) **Xây dựng đường $p_h = f(d)$.** Các giá trị p_h được tính dựa trên cơ sở phương trình:

$$p_h = p \frac{d}{0,622 + d}$$

Trên đồ thị các giá trị p_h được đặt ở góc phải phía dưới. Đường $p_h = f(d)$ gần như là đường thẳng.

b) **Xây dựng các đường $t = \text{const}$**

Từ phương trình $I = t + d$ ($2500 + 1,84 t$), khi thay $t = \text{const}$ vào ta được quan hệ $I = f(d)$ có dạng các đường thẳng. Vì vậy, với một nhiệt độ đã cho ta chỉ cần xác định entanpi ở hai điểm tương ứng $d_0 = 0$ và d_1 nào đó ta sẽ thu được đường $t = \text{const}$. Các đường này có độ dốc dương, khi t càng lớn thì độ dốc càng tăng.

c) **Xây dựng các đường $\varphi = \text{const}$**

Các đường $\varphi = \text{const}$ được xây dựng từng điểm một dựa vào đường $p_h = f(d)$ và các đường $t = \text{const}$. Đầu tiên ta dựng đường $\varphi = 100\%$ như sau:

Với nhiệt độ t_1 ta dùng bảng hơi nước xác định được giá trị p_{hs1} . Trên đồ thị, từ giá trị này kẻ đường song song với trực hoành cắt đường $p_h = f(d)$ tại điểm $1'$. Từ đây kẻ đường song song với trực tung, cắt đường $t_1 = \text{const}$ tại điểm 1. Ta được một giá trị của đường $\varphi = 100\%$. Làm tương tự với nhiều giá trị nhiệt độ ta sẽ được đường cong $\varphi = \text{const}$.

Xây dựng đường $\varphi = \text{const}$ với các giá trị khác (ví dụ $\varphi_1 = 50\%$) như sau: Với nhiệt độ t_1 ta dùng bảng hơi nước xác định được giá trị p_{hs1} . Sau đó xác định $p_{hl} = \varphi_1 \cdot p_{hs1} = 0,5 p_{hs1}$. Từ trị số p_{hl} kẻ đường song song với trực hoành cắt đường $p_h = f(d)$ tại điểm 2'. Từ đây kẻ đường song song với trực tung, cắt đường $t_1 = \text{const}$ tại điểm 2. Điểm 2 là một điểm của đường cong $\varphi_1 = 50\%$. Cho nhiều giá trị nhiệt độ khác nhau ta sẽ được nhiều giá trị của đường cong $\varphi_1 = 50\%$.

Các đường $\varphi = \text{const}$ ở vùng nhiệt độ $t > 100^{\circ}\text{C}$ sẽ trở nên thẳng đứng vì như đã trình bày ở phần trên, khi nhiệt độ KKA lớn hơn 100°C thì khi $\varphi = \text{const}$ sẽ kéo theo $d = \text{const}$.

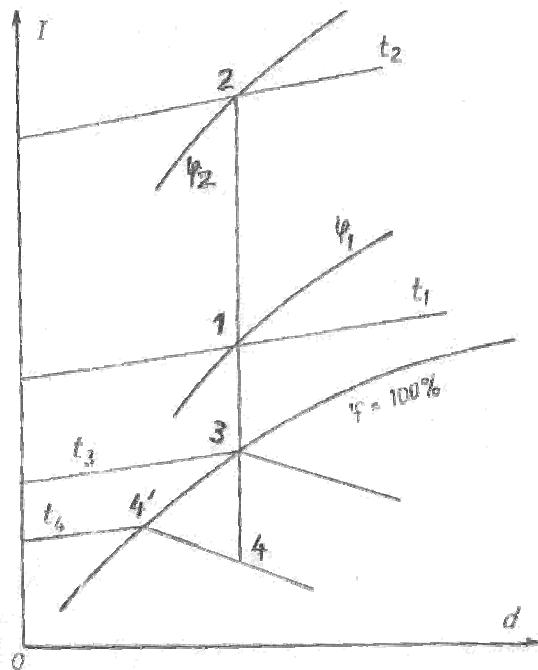
2.1.3.3. Biểu diễn các quá trình cơ bản của KKA trên đồ thị I-d

a) Xác định các thông số KKA

Mỗi điểm trên đồ thị mô tả một trạng thái của không khí ẩm, được xác định bởi hai thông số vật lý độc lập. Tuỳ thuộc trạng thái ta có thể tìm được giá trị t , t_{ds} , t_w , I , φ , d , p_h và p_{hs} của KKA ngay trên đồ thị. Trong các trường hợp khác thì phải kết hợp với phương pháp giải tích.

b) Quá trình làm nóng và làm lạnh KKA

Trong thực tế quá trình làm nóng và làm lạnh KKA thường xảy ra trong điều kiện độ chứa ẩm không đổi (hình 2.3). Quá trình làm nóng là đường 1-2, nhiệt độ tăng lên còn độ ẩm tương đối giảm đi và độ chứa ẩm $d = \text{const}$. Nhiệt lượng cần cung cấp cho quá trình này là $q = I_2 - I_1$.



Hình 2.3. Quá trình làm lạnh và làm nóng không khí ẩm

Quá trình làm lạnh thì ngược lại, là đường 2-1. Quá trình làm lạnh KKA sẽ kết thúc khi KKA trở nên bão hòa (điểm 3).

Nếu tiếp tục làm lạnh thì KKA trở nên quá bão hòa và ở dạng sương mù với hơi bão hòa ẩm (điểm 4). Khi tách hoàn toàn các giọt nước ngưng ở đây thì ta được KKA bão hòa (điểm 4') có độ chứa ẩm $d_4' < d_3$. Bằng cách này ta đã làm giảm độ chứa ẩm của không khí. Đây là nguyên lý làm việc của máy hút ẩm.

a) Quá trình hỗn hợp của hai dòng KKA

Trong kỹ thuật ta thường gặp các trường hợp hoà trộn hai dòng không khí với các trạng thái khác nhau. Nếu có G_1 kg KKA ở trạng thái A (d_1, I_1) hoà trộn với G_2 kg KKA ở trạng thái B (d_2, I_2), (hình 2.4) thì phương trình cân bằng năng lượng sẽ là:

$$I_1 G_1 + I_2 G_2 = (G_1 + G_2) I_h \quad (2-19)$$

Chia phương trình trên cho G_1 và đặt $n = \frac{G_2}{G_1}$ - gọi là tỷ lệ hỗn hợp, ta có:

$$\text{Entanpi của hỗn hợp:} \quad I_h = \frac{I_1 + nI_2}{1+n} \quad (2-20)$$

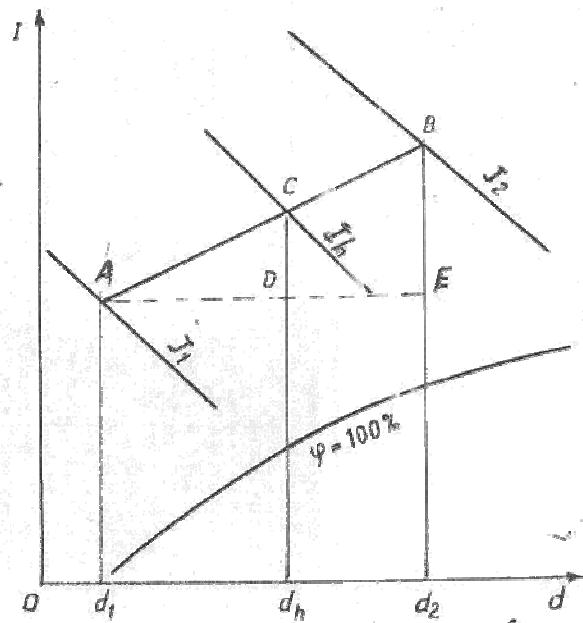
$$\text{Tương tự, độ chứa ẩm của hỗn hợp:} \quad d_h = \frac{d_1 + nd_2}{1+n} \quad (2-21)$$

Từ các phương trình trên ta thấy: khi biết trạng thái của hai dòng KKA và trạng thái của dòng hỗn hợp ta có thể xác định được tỷ lệ hỗn hợp:

$$n = \frac{I_h + I_1}{I_2 + I_h} = \frac{d_h + d_1}{d_2 + d_h} \quad (2-22)$$

Đây là phương trình đường thẳng đi qua ba điểm A, B và C. Trạng thái của không khí sau khi hỗn hợp (điểm C) nằm trên đường thẳng nối hai điểm A và B với tỷ lệ:

$$n = \frac{AC}{CB} = \frac{AD}{DE} \quad (2-23)$$

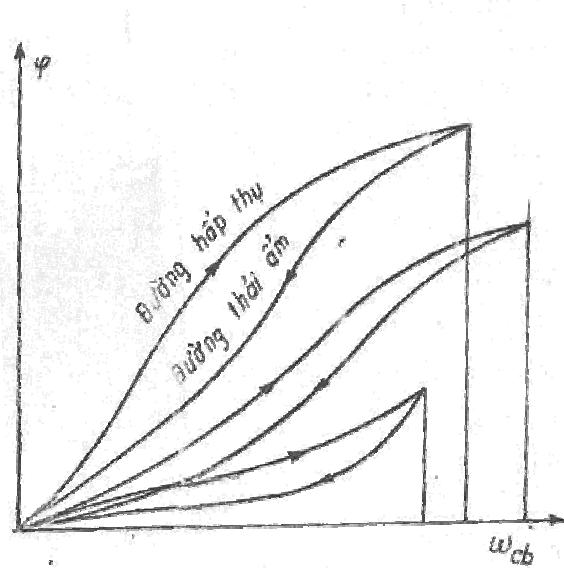


Hình 2.4. Quá trình hỗn hợp 2 dòng không khí có trạng thái khác nhau.

2.1.4. Tương tác giữa KKA và vật ẩm

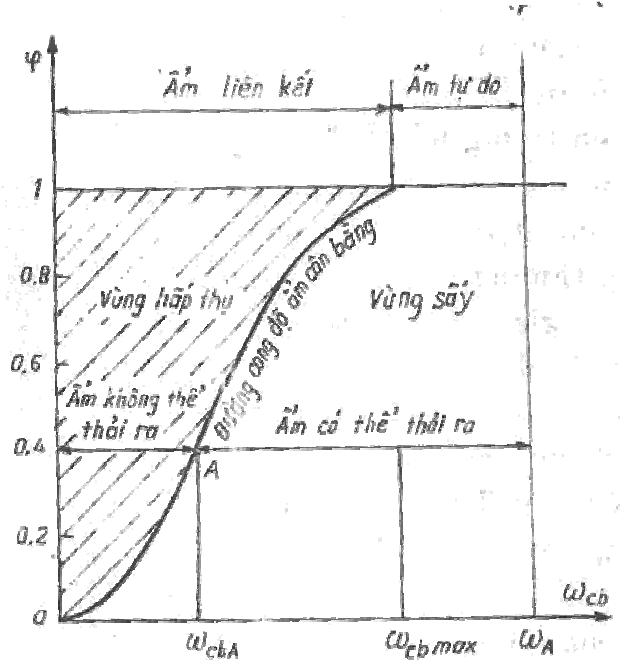
Một vật ở trong môi trường KKA sẽ có sự trao đổi nhiệt, ẩm giữa vật với môi trường. Các quá trình này phụ thuộc vào chênh lệch nhiệt độ, phân áp suất hơi nước trên bề mặt vật (p_{hv}) và phân áp suất hơi nước trong KKA (p_h). Trong trường hợp $p_{hv} > p_h$ thì xảy ra hiện tượng bay hơi nước từ vật vào môi trường được gọi là quá trình tách ẩm. Ngược lại, khi $p_{hv} < p_h$ thì vật sẽ hấp thụ ẩm của môi trường và gọi là quá trình hút ẩm. Trong cả hai trường hợp trên dẫn đến khi $p_{hv} = p_h$ thì kết thúc và độ ẩm của vật lúc này gọi là độ ẩm cân bằng ω_{cb} . Độ ẩm cân bằng của vật phụ thuộc vào phân áp suất hơi nước trong KKA p_h (hay độ ẩm tương đối φ và t) thường được biểu diễn $\omega_{cb} = f(\varphi)$ và bản chất của vật ẩm.

Trong các thí nghiệm ở điều kiện nhiệt độ không đổi, khi độ ẩm cân bằng của vật đạt được nhờ quá trình hút ẩm từ môi trường thì đường cong $\omega_{cb} = f(\varphi)$ gọi là đường hấp thụ đẳng nhiệt. Ngược lại, nếu trạng thái cân bằng đạt được nhờ quá trình bay hơi ẩm từ vật thì đường cong $\omega_{cb} = f(\varphi)$ gọi là đường thải ẩm đẳng nhiệt. Kết quả cho thấy các đường hấp thụ đẳng nhiệt và đường thải ẩm đẳng nhiệt không trùng nhau và đường hấp thụ đẳng nhiệt nằm cao hơn đường thải ẩm đẳng nhiệt do đó tạo nên vùng trễ cân bằng ẩm như trong hình 2.5.



Hình 2.5. Đường cong hấp thụ và nhả ẩm đẳng nhiệt

Độ ẩm cân bằng của vật ẩm ứng với độ ẩm tương đối $\varphi = 100\%$ của môi trường, gọi là độ ẩm cân bằng giới hạn $w_{cb\max}$ (còn gọi là độ ẩm hút nước) - giới hạn của độ ẩm liên kết. Vật khô tuyệt đối ở trong môi trường $\varphi = 0\%$ sẽ có $w_{cb} = 0\%$. Khi tăng độ ẩm của môi trường thì vật sẽ hút ẩm và w_{cb} cũng tăng theo. Khi vật đạt tới $w_{cb\max}$, muốn tăng độ ẩm của vật phải nhúng vật vào nước hay có nước ngưng tụ trên bề mặt vật. Ẩm thâm nhập vào vật lúc này gọi là ẩm tự do. Khi sấy, ẩm sẽ thoát ra theo trình tự sau: trước hết là ẩm tự do, sau đó là ẩm liên kết thẩm thấu, ẩm liên kết mao dẫn và cuối cùng là ẩm liên kết hấp phụ. Năng lượng cần để bay hơi ẩm tự do bằng năng lượng để hoá hơi nước tự do. Còn năng lượng để hoá hơi ẩm liên kết sẽ lớn hơn và tăng dần theo trình tự thoát ẩm như phân tích ở trên. Hình 2-6 cho thấy: với không khí có $\varphi = 100\%$ thì chỉ có thể làm bay hơi ẩm tự do của vật. Muốn cho vật khô hơn phải giảm độ ẩm tương đối của không khí. Ví dụ: nếu không khí có $\varphi = 40\%$ thì phần ẩm có thể tách được là $\Delta w = w_A - w_{cbA}$; phần ẩm còn lại trong vật là w_{cbA} .

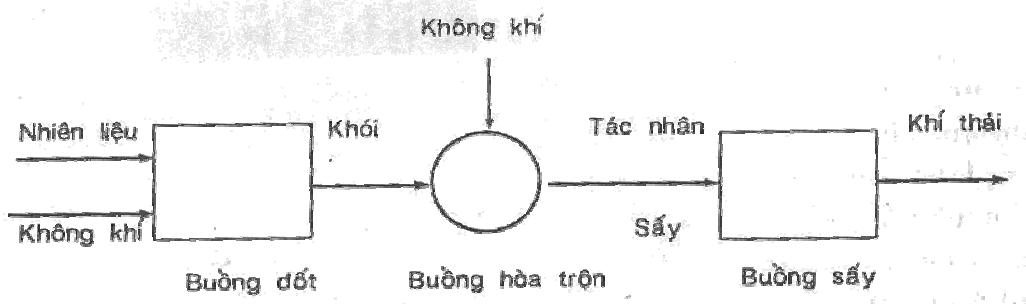


Hình 2.6. Trạng thái tương tác giữa ẩm và môi trường

2.2. KHÓI LÒ

2.2.1. Nguyên lý hệ thống sấy bằng khói

Ngoài KKA, khói lò cũng là TNS phổ biến. Khói lò được lấy từ việc đốt các loại nhiên liệu, chủ yếu là than đá, các loại củi và dầu. Khói lò thường sử dụng với tư cách là nguồn cung cấp nhiệt cho TNS nhưng trong nhiều trường hợp cho phép sử dụng khói trực tiếp để sấy. Sơ đồ nguyên lý hệ thống sấy bằng khói lò được mô tả ở hình 2-7.



Hình 2.7. Sơ đồ nguyên lý hệ thống sấy bằng khói

Sử dụng khói lò làm TNS có các ưu, nhược điểm sau:

- a) Ưu điểm

- có thể điều chỉnh nhiệt độ của TNS trong phạm vi lớn, từ 40-50°C đến 900-1000°C

- cấu trúc hệ thống sấy đơn giản, dễ chế tạo và lắp đặt

- vốn đầu tư thấp, ít tiêu hao điện năng

- hiệu quả sử dụng nhiệt cao

b) Nhược điểm

- gây bụi bẩn cho sản phẩm và thiết bị

- có thể gây hoả hoạn hoặc xảy ra các phản ứng hoá học ảnh hưởng xấu đến chất lượng sản phẩm

Phương pháp sấy dùng khói lò chỉ nên sử dụng đối với các sản phẩm cho phép và thường dùng để sấy các sản phẩm của gỗ như bút chì, que diêm, các vật liệu xây dựng, đồ gốm sứ và một số hạt nông lâm sản.

2.2.2. Tính toán

Việc tính toán quá trình cháy trong hệ thống sấy dùng khói lò bao gồm:

a) Xác định tiêu hao không khí lý thuyết cho quá trình sấy L_0 [kg KKK/ kg nl]

Có thể xác định L_0 bằng hai cách:

- + Theo thành phần nhiên liệu:

Với nhiên liệu khí :

$$L_0 = 1,38 \left\{ 0,0179 \text{ CO} + 0,248 \text{ H}_2 + \sum \frac{m + \frac{n}{4}}{12m + n} C_m H_n \right\} \quad (2-24)$$

Trong đó CO, H₂, C_mH_n là thành phần nhiên liệu theo khối lượng.

Với nhiên liệu rắn :

$$L_0 = \frac{1}{23} (2,67 C_{LV} + 8 H_{LV} - S_{LV} - O_{LV}) \quad (2-25)$$

Trong đó C_{LV}, H_{LV}, S_{LV}, O_{LV} là thành phần của nhiên liệu theo khối lượng làm việc

- + Theo nhiệt trị cao của nhiên liệu Q^C_{LV} [Kcalo/kg]

$$L_0 = 1,1 \frac{1,293 Q_{LV}^C}{1000} \quad (2-26)$$

b) Xác định hệ số không khí thừa α

Hệ số α ở đây được tính chung cho cả buồng đốt và hoà trộn là:

$$\alpha = \frac{Q_{LV}^C \eta_{bd} + C_{nl} t_{nl} - (9H + A)i_a - (1 - 9H - A - Tr)C_{pk} t}{L_0 \{ d_0 (i_a - i_{ao}) + C_{pk} (t - t_0) \}} \quad (2-27)$$

với: η_{bd} - hiệu suất buồng đốt

C_{nl}, C_{pk} - tương ứng là nhiệt dung riêng của nhiên liệu và khói khô

i_a và i_{ao} - entanpi của hơi nước chứa trong khói sau buồng hoà trộn và không khí ngoài trời, được tính theo công thức $i = 2500 + 1,84 t$, kJ/kg

d_0 - độ chứa ẩm của không khí ứng với nhiệt độ t_0

t_{nl} , t - nhiệt độ ban đầu của nhiên liệu và nhiệt độ của khói sau buồng hoà trộn

H , A , Tr - các thành phần của nhiên liệu

c) Xác định khối lượng khói khô

Khối lượng khói khô sau buồng hoà trộn (hay trước khi vào buồng sấy) được tính:

$$L_{Kh} = (\alpha L_0 + 1) - (Tr + 9H + A) \quad (2-28)$$

d) Xác định độ chứa ẩm của khói khô

Độ chứa ẩm của khói khô sau buồng hoà trộn sẽ là:

$$d_{Kh} = \frac{(9H + A) + \alpha L_0 d_0}{\alpha L_0 + (1 - Tr - 9H - A)} \quad (2-29)$$

e) Xác định entanpi của khói

Entanpi của khói sau buồng hoà trộn:

$$I_{Kh} = \frac{Q_{LV}^C \eta_{bd} + C_{nl} t_{nl} + \alpha L_0 I_0}{L_{Kh}} \quad (2-30)$$

Sau khi đã xác định các thông số trên có thể xem khói như không khí ẩm và sử dụng đồ thị I-d để biểu diễn, tính toán quá trình sấy.

Chương 3. TRUYỀN NHIỆT - TRUYỀN CHẤT TRONG QUÁ TRÌNH SẤY

Sấy là quá trình làm khô vật liệu ẩm khi được cung cấp năng lượng với các trình tự sau:

- gia nhiệt để đưa nhiệt độ của VLA đến nhiệt độ bão hòa ứng với phân áp suất hơi nước trên bề mặt vật (t_u)
- cấp nhiệt để làm bay hơi ẩm trong VLA; ẩm dịch chuyển từ trong lòng vật ra ngoài bề mặt và bay hơi
- đưa hơi ẩm thoát khỏi vật ra môi trường ngoài.

Như vậy quá trình sấy bao gồm cả truyền nhiệt và truyền chất, tiến hành đồng thời và có ảnh hưởng với nhau.

3.1. QUÁ TRÌNH TRUYỀN ẨM TRONG VẬT LIỆU

Trong nhiều công trình nghiên cứu thì quá trình truyền nhiệt và truyền chất được coi là đồng dạng với nhau. Vì thế có thể mô tả quá trình truyền chất với các phương trình như ở quá trình truyền nhiệt. Tương tự như phương trình Fourier về dẫn nhiệt ta có phương trình mô tả sự dẫn ẩm trong vật như sau:

$$j = - \lambda_a \nabla_u = - a_m \rho_0 \nabla_u \quad (3-1)$$

với: j - dòng ẩm được truyền

λ_a - hệ số dẫn chất (tương tự như hệ số dẫn nhiệt), xác định khả năng truyền ẩm của vật liệu

a_m - hệ số dẫn thế ẩm (tương tự như hệ số dẫn nhiệt độ), đặc trưng cho tốc độ biến đổi thế truyền ẩm trong vật

ρ_0 - khối lượng riêng của vật khô tuyệt đối

∇_u - gradien độ chứa ẩm

$$\nabla_u = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z}$$

Cũng như dẫn nhiệt ta có phương trình vi phân dẫn chất là:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 u \quad (3-2)$$

Theo A.V. Lucop thì gradien nhiệt độ cũng gây nên sự khuếch tán ẩm trong vật thể. Dưới tác động của dòng nhiệt thì cũng có một lượng ẩm dịch chuyển cùng chiều với nó. Khi kể đến yếu tố này thì dòng ẩm tổng hợp sẽ là:

$$j = - a_m \rho_0 \nabla_u + a_m \rho_0 \delta \Delta t = j_a + j_t \quad (3-3)$$

trong đó: δ - hệ số gradien nhiệt độ, cho biết sự chênh lệch hàm ẩm khi có sự chênh lệch nhiệt độ

Δt - độ chênh lệch nhiệt độ

j_a - dòng ẩm do dẫn ẩm

j_t - dòng ẩm do khuếch tán nhiệt

Phương trình vi phân dẫn ẩm có dạng:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_m \delta \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

Công thức (3-3) chỉ đúng với trường hợp khi nhiệt độ trong tâm vật liệu sấy lớn hơn nhiệt độ bề mặt vật (trong trường sấy bằng tia hồng ngoại, sấy bằng dòng điện cao tần). Còn khi sấy đối lưu, quá trình truyền nhiệt thực hiện từ bề mặt vào trong vật sấy thì nhiệt độ bề mặt vật lại lớn hơn nhiệt độ trong lòng vật. Điều này gây nên sự ngược chiều giữa dòng ẩm do khuếch tán nhiệt với dòng ẩm do dẫn ẩm. Vì vậy dòng ẩm từ trong vật sấy truyền ra ngoài khi sấy đối lưu sẽ là:

$$j = j_a - j_t \quad (3-4)$$

Với các trường hợp sấy tiếp xúc khi sự gia nhiệt thực hiện ở một phía của vật thì gradien độ ẩm có chiều từ bề mặt tiếp xúc hướng ra phía ngoài còn gradien nhiệt độ có chiều ngược lại. Khi đó dòng ẩm thoát ra khỏi vật là:

$$j = j_t - j_a \quad (3-5)$$

Qua các phân tích trên cho thấy khi hiệu số nhiệt độ, hiệu số độ ẩm ở trong tâm và bề ngoài mặt vật càng lớn thì tốc độ sấy càng cao. Ngược lại, khi nhiệt độ và độ ẩm ở bề mặt vật lớn hơn bên trong vật thì sẽ gây nên cản trở sự thoát ẩm, thậm chí có thể làm cho ẩm chuyển ngược từ ngoài vào trong lòng vật.

3.2. QUÁ TRÌNH TRAO ĐỔI NHIỆT-TRAO ĐỔI CHẤT GIỮA BỀ MẶT VẬT VỚI MÔI TRƯỜNG

Sấy là một quá trình phức tạp bao gồm cả sự trao đổi nhiệt và trao đổi chất giữa vật liệu với môi trường. Nhận nhiệt từ môi trường, vật liệu tăng nhiệt độ đồng thời nhả ẩm vào môi trường. Dòng hơi ẩm thoát ra từ vật có thể phân tích bao gồm ba thành phần: dòng ẩm khuếch tán do chênh lệch nồng độ ẩm giữa bề mặt vật với môi trường j_a ; dòng ẩm khuếch tán nhiệt do chênh lệch nhiệt độ j_t và dòng ẩm khuếch tán phân tử do chênh lệch phân áp suất hơi ở bề mặt vật với môi trường j_p :

$$j = j_a + j_t + j_p \quad (3-6)$$

Thông thường dòng ẩm khuếch tán j_a và dòng khuếch tán phân tử j_p đóng vai trò chủ yếu, còn dòng khuếch tán nhiệt rất nhỏ, có thể bỏ qua trong nhiều trường hợp. Khi nhiệt độ tăng thì lượng ẩm thoát ra bằng dòng phân tử tăng theo. Với áp suất khí quyển, ở nhiệt độ 100 °C thì dòng phân tử là chủ yếu. Quá trình truyền nhiệt từ môi trường tới vật liệu sấy và quá trình truyền ẩm, ngược lại, từ vật liệu ra môi trường có ảnh hưởng lẫn nhau.

Trong nhiều công trình nghiên cứu đã coi quá trình truyền nhiệt và truyền chất là tương tự và có thể mô tả bằng những phương trình tiêu chuẩn giống nhau. Đối với quá trình truyền nhiệt như đã biết, ta có:

$$Nu = A_1(GrPr)^n \quad \text{hoặc} \quad Nu = A_2 Re^m Pr^K \quad (3-7)$$

Thì đối với quá trình truyền chất ta cũng có :

$$Nu_m = A_3(Gr_m Pr_m)^n \quad \text{hoặc} \quad Nu_m = A_4 Re_m^m Pr_m^K \quad (3-8)$$

cùng với các tiêu chuẩn đồng dạng:

$$Re_m = \frac{\nu l}{\gamma}; \quad Nu_m = \frac{\alpha_m l}{\lambda_a}; \quad Gr_m = \frac{\beta g l^3 \Delta t}{\gamma^2}; \quad Pr_m = \frac{\gamma}{a_m} \quad (3-9)$$

Với : α_m - hệ số trao đổi chất đối lưu

λ_a - hệ số dẫn chất

a_m - hệ số dẫn thế truyền ẩm

còn các đại lượng khác cũng như trong truyền nhiệt.

Hệ số dẫn thế truyền ẩm a_m đã trình bày ở (1-32), hệ số dẫn chất (dẫn ẩm) λ_a ở (1-33), còn hệ số trao đổi chất (trao đổi ẩm) đối lưu α_m cũng giống như hệ số trao đổi nhiệt α được xác định bằng thực nghiệm cho nhiều trường hợp cụ thể khác nhau từ các phương trình tiêu chuẩn mô tả quá trình trao đổi nhiệt-trao đổi chất giữa bề mặt VLA với môi trường xung quanh.

Tương tự định luật Newton về trao đổi nhiệt đối lưu, dòng ẩm truyền từ bề mặt vật vào môi trường cũng được mô tả bằng định luật Danton :

$$j = \alpha_m (p_{hv} - p_{hm}), \quad \text{kg/m}^2\text{h} \quad (3-10)$$

với : α_m - hệ số trao đổi chất đối lưu

p_{hv} - áp suất hơi ẩm trên bề mặt vật

p_{hm} - phân áp suất hơi nước trong môi trường

Nếu sự bay hơi nước này do nguồn nhiệt cấp từ môi trường không khí xung quanh bằng quá trình trao đổi nhiệt đối lưu theo định luật Newton là :

$$q = \alpha (t_f - t_{hv}), \quad \text{kj/m}^2\text{h} \quad (3-11)$$

thì ta có thể tính được :

$$j = \frac{q}{r} \quad (3-12)$$

với r - nhiệt hoá hơi của nước.

Phân tích trên dựa trên cơ sở cho rằng cường độ sấy vật liệu trong giai đoạn tốc độ sấy không đổi bằng cường độ bay hơi của nước từ bề mặt nước tự do trong những điều kiện xác định như nhau qua nhiều thực nghiệm.

Chương 4. ĐỘNG HỌC QUÁ TRÌNH SẤY

Động học quá trình sấy khảo sát sự thay đổi các thông số đặc trưng của VLS trong quá trình sấy. Các thông số đó thường là độ chứa ẩm u , độ ẩm ω , nhiệt độ vật sấy t_v , tốc độ sấy $\frac{\partial u}{\partial \tau}$ (hay $\frac{\partial \omega}{\partial \tau}$). Các thông số này thay đổi theo thời gian và phụ thuộc vào quá trình TĐN-TĐC giữa VLS với môi trường xung quanh. Để xác định $u = f(x, y, z, \tau)$ và $t = f(x, y, z, \tau)$ bằng giải tích, cần phải giải các hệ phương trình vi phân phi tuyến rất phức tạp. Vì thế khi nghiên cứu động học quá trình sấy thường dùng phương pháp thực nghiệm để xác định các thông số đó, đồng thời có thể mô tả chính xác các đặc điểm diễn biến của quá trình sấy. Để tiện khảo sát người ta xét quá trình sấy đổi lưu với tác nhân sấy là không khí nóng có độ ẩm tương đối φ , nhiệt độ t_k và tốc độ ổn định (không thay đổi); vật sấy mỏng, có bề mặt bay hơi tương đối lớn, quá trình sấy chậm sao cho độ ẩm và nhiệt độ ở mọi chỗ là như nhau.

4.1. ĐẶC ĐIỂM DIỄN BIẾN CỦA QUÁ TRÌNH SẤY

Theo sự thay đổi nhiệt độ của VLS thì quá trình sấy có ba thời kỳ:

- thời kỳ làm nóng vật. VLS được gia nhiệt để đạt được nhiệt độ nhiệt kế ướt t_u
- thời kỳ tốc độ sấy không đổi. VLS có nhiệt độ không đổi và bằng t_u
- thời kỳ tốc độ sấy giảm dần. VLS có nhiệt độ lớn hơn t_u và tăng dần đến nhiệt độ môi trường sấy.

Trong ba thời kỳ trên thì thời kỳ thứ nhất thường xảy ra rất nhanh so với hai thời kỳ sau. Khi phân tích quá trình sấy người ta kết hợp hai thời kỳ đầu làm một và chia quá trình sấy thành hai giai đoạn: giai đoạn tốc độ sấy không đổi và giai đoạn tốc độ sấy giảm dần.

4.1.1. Giai đoạn tốc độ sấy không đổi

Giai đoạn này bắt đầu từ khi đưa vật vào buồng sấy cho đến khi thoát hết ẩm tự do. Ban đầu toàn bộ vật được gia nhiệt, nhiệt độ của nó tăng dần cho tới khi bằng nhiệt độ nhiệt kế ướt (t_u). Sự tăng nhiệt độ ngoài bề mặt vật diễn ra nhanh hơn so với trong tâm. Độ ẩm của vật có giảm nhưng không đáng kể.

Khi toàn bộ vật đã đạt được nhiệt độ nhiệt kế ướt thì lượng nhiệt tiếp tục cung cấp chỉ để hoá hơi ẩm chứ không làm tăng nhiệt độ của vật ($t_v = t_u = \text{const}$) nên độ chênh nhiệt độ giữa vật với môi trường là không đổi (cho rằng nhiệt độ của không khí nóng giữ nguyên). Nếu gọi sự giảm độ chứa ẩm (độ ẩm) của vật liệu trong một đơn vị thời gian là tốc độ sấy ($\frac{\partial u}{\partial \tau}$) thì trong giai đoạn này $\frac{\partial u}{\partial \tau} = \text{const}$, nên được gọi là giai đoạn tốc độ sấy không đổi. Ẩm thoát ra trong giai đoạn này là ẩm tự do, biến thiên của độ chứa ẩm theo thời gian là tuyến tính. Khi đã bay hơi hết ẩm tự do, độ ẩm của vật đạt

đến giá trị ω_K nào đó (gọi là độ ẩm tối hạn) thì giai đoạn tốc độ sấy không đổi kết thúc.

4.1.2. Giai đoạn tốc độ sấy giảm dần

Như đã biết, năng lượng để bay hơi ẩm liên kết lớn hơn so với ẩm tự do và tăng lên khi độ ẩm của vật càng giảm. Vì vậy tốc độ bay hơi ẩm lúc này nhỏ hơn so với trước và càng giảm dần theo thời gian. Trong khi đó nhiệt độ của vật lại tăng dần, lớn hơn nhiệt độ nhiệt kế ướt, tiến tới nhiệt độ của môi trường. Khi độ ẩm của vật giảm xuống bằng độ ẩm cân bằng (u_{cb} , ω_{cb}) ứng với điều kiện môi trường xung quanh, nhiệt độ của vật bằng nhiệt độ môi trường, vật với môi trường cân bằng nhiệt và ẩm thì quá trình bay hơi ẩm chấm dứt, có nghĩa tốc độ sấy bằng không $\frac{\partial u}{\partial \tau} = 0$. Tốc độ sấy nhỏ càng giảm thì thời gian sấy càng dài, phần lớn các VLS thời gian ở giai đoạn này lớn hơn rất nhiều so với giai đoạn tốc độ sấy không đổi. Để cho độ ẩm của vật đạt được độ ẩm cân bằng thì thời gian sấy $\tau \rightarrow \infty$ vì thế trong thực tế cuối quá trình sấy vật thường có độ ẩm cuối cùng ω_2 lớn hơn độ ẩm cân bằng. Do độ ẩm cân bằng phụ thuộc vào môi trường (t_K , φ) cho nên cần chọn các thông số của tác nhân sấy (không khí nóng) ở cuối quá trình sấy phù hợp với độ ẩm yêu cầu của vật liệu sấy.

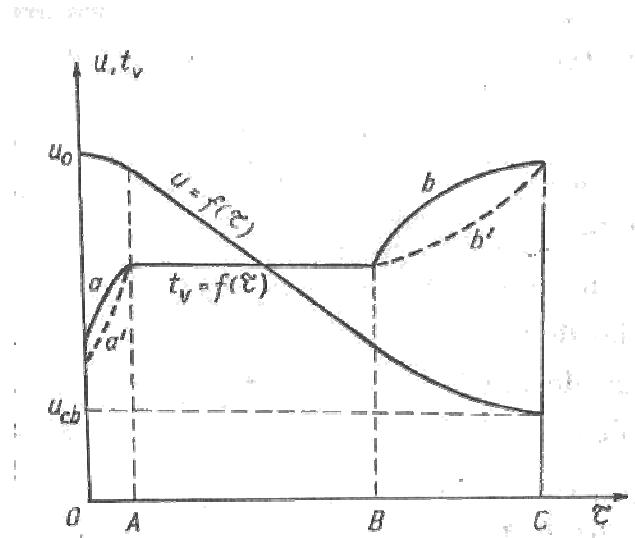
4.2. NHỮNG QUY LUẬT CƠ BẢN CỦA QUÁ TRÌNH SẤY

Khi nghiên cứu quá trình sấy, các quy luật thay đổi những đặc tính cơ bản của quá trình thu được bằng thực nghiệm và biểu diễn ở dạng đồ thị. Đó là các quy luật thay đổi độ ẩm, nhiệt độ của vật theo thời gian sấy và quy luật thay đổi tốc độ sấy theo độ ẩm của vật liệu.

4.2.1. Đường cong sấy

Đường cong sấy biểu diễn quan hệ giữa độ chứa ẩm và nhiệt độ của VLS theo thời gian: $u = f(\tau)$ và $t_v = f(\tau)$

Đường cong sấy có thể chia làm 3 phần tương ứng với 3 thời kỳ của quá trình sấy bằng các đoạn OA, AB và BC trên hình 4-1.

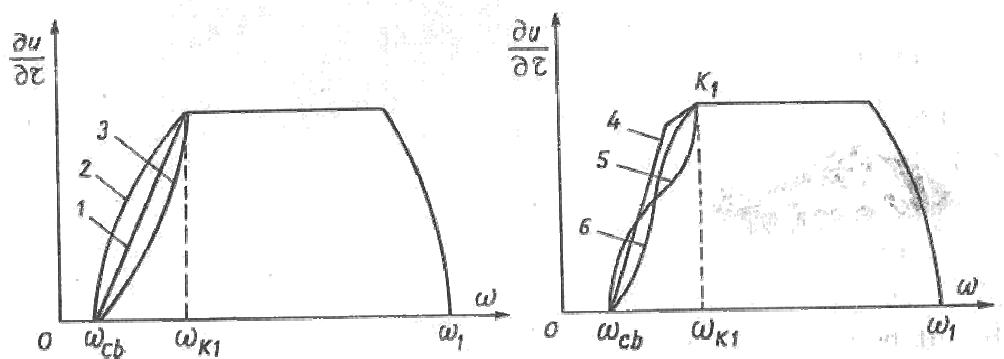


Hình 4.1. Đường cong sấy

Trên hình vẽ ta thấy ở thời kỳ tốc độ sấy không đổi thì nhiệt độ của vật không đổi ($t_v=t_u=\text{const}$), độ chứa ẩm có quan hệ tuyến tính với thời gian. Trong thời kỳ làm nóng vật (gia nhiệt) và thời kỳ tốc độ sấy giảm dần các hệ độ chứa ẩm, nhiệt độ của VLA với thời gian có dạng đường cong. Sự thay đổi nhiệt độ trên bề mặt vật (thể hiện bằng đường a, b) và trong tâm của vật liệu (thể hiện bằng đường a', b') có khác nhau.

4.2.2. Đường cong tốc độ sấy

Theo định nghĩa thì tốc độ sấy $\frac{\partial u}{\partial \tau}$ là tg của góc nghiêng tiếp tuyến với đường cong sấy $u=f(\tau)$. Bằng phương pháp vi phân đồ thị ta dựng được đồ thị biểu diễn quan hệ giữa tốc độ sấy với độ ẩm của vật liệu (hình 4-2). Trong quá trình sấy độ ẩm của vật liệu giảm dần nên chiều di chuyển của đường cong tốc độ sấy là từ phải sang trái. Trong thời gian làm nóng vật tốc độ sấy tăng nhanh từ 0 đến giá trị $N = \frac{\partial u}{\partial \tau} = \text{const}$ sau đó giữ nguyên không đổi (đường biểu diễn nằm ngang) cho tới khi độ ẩm giảm xuống đến giá trị ω_{K1} (K1-điểm tới hạn thứ nhất).



Hình 4.2. Đường cong tốc độ sấy

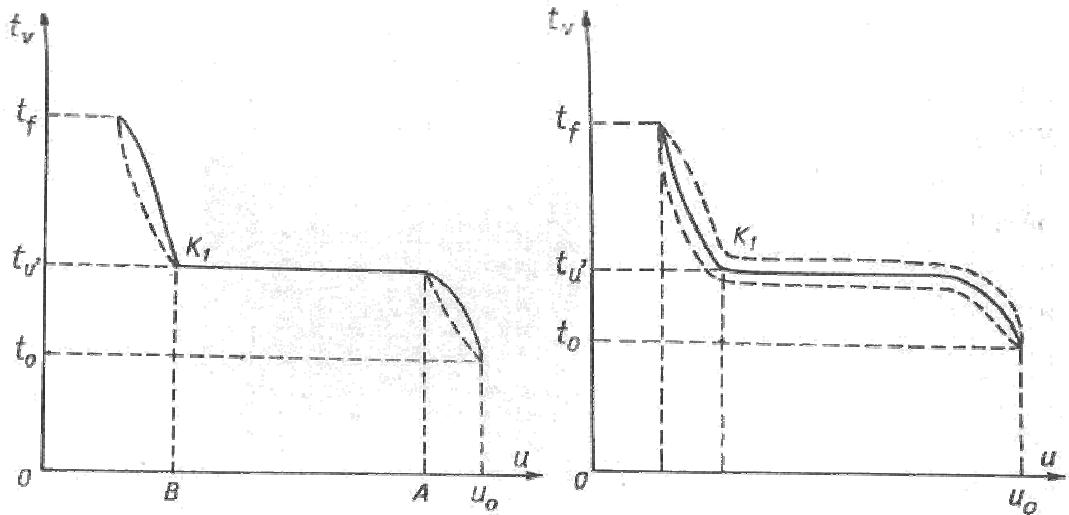
Từ điểm K1 quá trình sấy chuyển qua giai đoạn tốc độ sấy giảm dần. Khi đó tốc độ sấy giảm dần từ giá trị N xuống bằng 0 ứng với độ ẩm cân bằng của vật liệu ω_{cb} (được xác định bởi giao điểm của đường cong tốc độ sấy với trục hoành). Trong giai đoạn này đường cong tốc độ sấy có nhiều dạng khác nhau tùy thuộc vào tính chất và dạng vật liệu. Dựa vào đường cong tốc độ sấy có thể phân VLS thành 6 nhóm điển hình tương ứng với 6 đường:

- Đường 1 gân như thẳng ứng với các vật liệu mỏng có cấu trúc sợi như giấy, các tông mỏng...
- Đường 2 cong lồi về phía trục tung ứng với các vật như vải, da mỏng, bột nhào
- Đường 3 cong lồi về phía trục hoành ứng với các vật như gỗ, sứ...

Các vật liệu có cấu trúc phức tạp thì đường cong tốc độ sấy cũng có dạng phức tạp hơn và thường xuất hiện điểm uốn- điểm tối hạn thứ hai K2 với độ ẩm ω_{K2} . Đường 4,5,6 ứng với các vật keo xốp mao dẫn có cấu trúc phức tạp như đất sét, vụn bánh mỳ, các loại hạt thực phẩm...

4.2.3. Đường cong nhiệt độ sấy

Đường cong nhiệt độ sấy (hình 4-3) biểu diễn quan hệ giữa nhiệt độ với độ chứa ẩm của vật liệu $t_v = f(u)$. Cũng như đường cong tốc độ sấy, chiều diễn biến của đường cong nhiệt độ sấy là từ phải sang trái. Ban đầu vật liệu có các thông số u_0, t_0 , được gia nhiệt cho tới nhiệt độ t_U . Khi tốc độ sấy không đổi nhiệt độ của vật cũng không đổi ($t_v = t_U = \text{const}$). Qua giai đoạn tốc độ sấy giảm thì nhiệt độ của vật tăng dần tới nhiệt độ của môi trường sấy. Khi vật đạt được trạng thái cân bằng ẩm, cân bằng nhiệt với môi trường thì sẽ kết thúc quá trình bay hơi ẩm và có các thông số $\omega_{cb}, t_v = t_f$ (t_f là nhiệt độ của tác nhân sấy). Như đã trình bày ở trên thì sự thay đổi nhiệt độ trên bề mặt và trong tâm của vật có khác nhau.



Hình 4.3-4. Đường cong nhiệt độ của vật sấy

Riêng đối với vật xốp mao dãm thì đường cong nhiệt độ sấy có dạng khác đôi chút (hình 4-4). Trong giai đoạn tốc độ sấy không đổi, do cấu trúc của vật liệu nên vẫn tồn tại gradien nhiệt độ, nhiệt độ trên bề mặt và trong tâm vật có giá trị khác nhau. Có thể xảy ra hai trường hợp :

- nếu ban đầu các mao dãm đều chứa nước thì nhiệt độ bề mặt vật sẽ bằng t_u , còn nhiệt độ trong tâm sẽ nhỏ hơn.

- nếu các mao dãm không chứa ẩm hoặc có bề mặt không thoát ẩm (bề mặt vật tiếp xúc với khay đựng, bề mặt cấp nhiệt) thì nhiệt độ bề mặt vật sẽ lớn hơn t_u .

Đường cong nhiệt độ sấy có ý nghĩa rất lớn trong nghiên cứu quá trình sấy. Dựa vào đường cong nhiệt độ sấy có thể xác định các hình thức liên kết ẩm trong vật liệu chính xác hơn dựa vào đường cong tốc độ sấy. Trong quá trình sấy khi nhiệt độ của vật không thay đổi theo thời gian tương ứng với quá trình tách ẩm tự do. Khi nhiệt độ của vật thay đổi tuyến tính với thời gian thì tương ứng với quá trình tách ẩm mao dãm và ẩm hấp thụ đa phân tử, nếu nhiệt độ thay đổi theo luật thoái hoá thì tương ứng với quá trình tách ẩm hấp thụ đơn phân tử.

Như đã biết, chất lượng của VLS phần nhiều phụ thuộc vào nhiệt độ và thời gian tác động của nó. Điều này có liên quan đến việc chọn chế độ sấy thích hợp. Độ ẩm cân bằng ω_{cb} của vật phụ thuộc vào môi trường xung quanh (φ, t_f), do đó cần chọn các thông số của tác nhân sấy với thời gian ở cuối quá trình sấy sao cho vật liệu có thể đạt được độ ẩm yêu cầu công nghệ , tính kinh tế kỹ thuật.

4.3. PHÂN TÍCH QUÁ TRÌNH SẤY

Quá trình tách ẩm ra khỏi vật liệu khi sấy diễn biến theo các quá trình chủ yếu sau: cung cấp nhiệt cho vật sấy, sự di chuyển ẩm từ trong tâm ra ngoài bề mặt vật và sự bay hơi ẩm vào môi trường xung quanh. Khi phân tích quá trình sấy cần trình bày được quan hệ giữa lượng nhiệt cung cấp của tác nhân sấy với sự thay đổi nhiệt độ và độ ẩm của vật liệu, phương pháp xác định tốc độ sấy để làm cơ sở tính thời gian sấy. Phân tích quá trình sấy cũng theo hai giai đoạn: giai đoạn tốc độ sấy không đổi và giai đoạn tốc độ sấy giảm dần.

4.3.1. Giai đoạn tốc độ sấy không đổi

Trong giai đoạn này nhiệt lượng do tác nhân sấy cung cấp dùng để nâng nhiệt độ của vật lên tới nhiệt độ nhiệt kế ướt t_u và làm bay hơi ẩm. Khi đó phương trình cân bằng nhiệt có dạng :

$$dQ = (C_{pk}G_k + C_nG_n)dt_v + [r + C_{ph}(t_h - t_u)]dG_n \quad (4-1)$$

ở đây :

dQ - lượng nhiệt cấp cho vật liệu trong khoảng thời gian $d\tau$

C_{pk} , C_n - nhiệt dung riêng của vật liệu khô và nước (ẩm)

G_k , G_n - khối lượng của vật liệu khô và nước trong vật

dt_v - sự thay đổi nhiệt độ của vật trong khoảng thời gian $d\tau$

r - nhiệt hoá hơi của nước

C_{ph} - nhiệt dung riêng của hơi nước thoát ra khỏi vật

t_h - nhiệt độ của hơi nước thoát ra khỏi vật

t_u - nhiệt độ nhiệt kế ướt

dG_n - lượng nước bay ra khỏi vật trong khoảng thời gian $d\tau$

Mặt khác, ta biết rằng lượng nhiệt cấp cho vật liệu trong khoảng thời gian $d\tau$ được lấy từ tác nhân sấy trong quá trình trao đổi nhiệt đối lưu, nên có:

$$dQ = \alpha F(t_f - t_u) d\tau \quad (4-2)$$

với : α - hệ số trao đổi nhiệt đối lưu

F - diện tích bê bê mặt vùa vật liệu tiếp xúc với môi trường sấy

t_f - nhiệt độ tác nhân sấy

Từ hai phương trình trên thì tốc độ sấy được xác định như sau:

$$Z_1 = \frac{dG_n}{d\tau} = \frac{\alpha F(t_f - t_u) - (C_{pk}G_k + C_nG_n)\frac{dt_v}{d\tau}}{r + C_{ph}(t_h - t_u)} \quad (4-3)$$

Trong giai đoạn tốc độ sấy không đổi thì $dt_v = 0$ và hơi ẩm thoát ra từ bề mặt vật là hơi bão hòa có nhiệt độ $t_h = t_u$. Vì thế (4-3) có thể viết là :

$$Z_1 = \frac{dG_n}{d\tau} = \frac{\alpha F(t_f - t_u)}{r} \quad (4-4)$$

Với các thông số có giá trị không đổi như trên ta có thể nhận thấy- như tên gọi của quá trình- $Z_1 = \text{const}$.

4.3.2. Giai đoạn tốc độ sấy giảm dần

Trong giai đoạn tốc độ sấy giảm dần ta thấy đường cong tốc độ sấy phức tạp và có nhiều dạng khác nhau. Nhiệt độ của vật liệu tăng dần đến nhiệt độ tác nhân sấy, độ chênh nhiệt độ giữa môi trường và VLS luôn thay đổi, dẫn đến sự không ổn định của quá trình trao đổi nhiệt. Lượng nhiệt cấp cho vật liệu không chỉ để làm bay hơi ẩm mà còn làm quá nhiệt hơi đó đồng thời làm tăng nhiệt độ của vật sấy. Lượng ẩm trong vật tuy giảm nhưng ẩm liên kết càng chặt chẽ nên càng cần nhiều năng lượng để hoá hơi. Mặt khác sự hoá hơi ẩm đã dịch chuyển dần vào trong lòng vật và khi nhiệt độ của vật liệu tăng lên thì hơi ẩm thoát ra khỏi vật sẽ là hơi quá nhiệt. Mỗi quan hệ giữa sự thay đổi độ ẩm của vật liệu với thời gian là phi tuyến tính. . . Quá trình sấy sẽ kết thúc khi vật liệu và tác nhân sấy đạt đến trạng thái cân bằng nhiệt và ẩm cùng với tốc độ sấy bằng không.

Qua những phân tích trên ta thấy việc đưa ra và giải các phương trình biểu diễn quan hệ giữa các đại lượng cần quan tâm của quá trình sấy ở giai đoạn này là khó khăn và không chính xác. Các kết quả thu được khi nghiên cứu ở giai đoạn này chủ yếu là bằng thực nghiệm và được biểu diễn phân tích ở dạng đồ thị kết hợp với phương pháp giải tích. Điều này sẽ được trình bày rõ hơn ở trong chương tiếp theo.

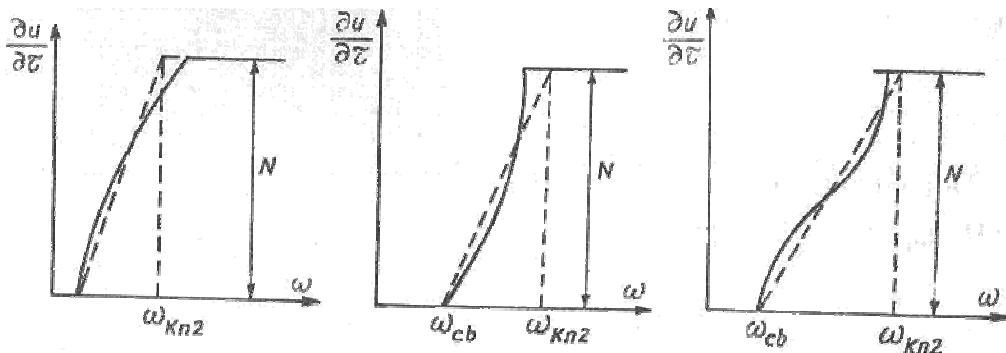
Chương 5. PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH THỜI GIAN SẤY

Cùng với các thông số của chế độ sấy để đảm bảo chất lượng sản phẩm và giảm chi phí năng lượng thì thời gian sấy là một thông số quan trọng, được sử dụng trong tính toán thiết kế và vận hành thiết bị sấy. Thời gian sấy phụ thuộc vào nhiều yếu tố (tính chất của vật sấy, phương pháp và thiết bị sấy, các thông số của chế độ sấy) và được xác định theo nhiều phương pháp (giải tích, thực nghiệm, kết hợp giải tích với thực nghiệm). Dưới đây sẽ trình bày một số phương pháp tính toán thời gian sấy được sử dụng rộng rãi với kết quả tính toán tương đối phù hợp theo thực tế.

5.1. PHƯƠNG PHÁP A.V. LUCỐP

Đây là phương pháp kết hợp những nghiên cứu lý thuyết với phân tích động học quá trình sấy trên cơ sở tính thời gian sấy theo hai giai đoạn và tuyến tính hóa đường cong tốc độ sấy trong giai đoạn tốc độ sấy giảm dần.

Ta thay đường cong tốc độ sấy ở giai đoạn tốc độ sấy giảm dần bằng một đường thẳng sao cho phần diện tích nằm dưới đường cong tốc độ sấy là không đổi như hình 5.1. Khi đó độ ẩm của vật liệu ở cuối giai đoạn tốc độ sấy không đổi sẽ là ω_{Kn2} như trên hình vẽ.



Hình 5.1. Tuyến tính hóa các dạng đường cong tốc độ sấy ở giai đoạn tốc độ sấy giảm.

Trong giai đoạn tốc độ sấy không đổi ta có tốc độ sấy $N = \frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \text{const}$, nếu độ ẩm ban đầu của vật là ω_1 (Trước khi sấy, vật liệu có độ ẩm là ω_0 , trong thời gian làm nóng vật lượng ẩm thay đổi rất ít nên có thể coi $\omega_0 = \omega_1$), thì thời gian sấy ở giai đoạn này sẽ là:

$$\tau_1 = \frac{\omega_1 - \omega_{Kn2}}{N} \quad (5-1)$$

Trong giai đoạn tốc độ sấy giảm dần khi độ ẩm của vật tại thời điểm nào đó (thường là độ ẩm cuối giai đoạn sấy) là ω_2 , còn độ ẩm cân bằng là ω_{cb} thì thời gian sấy ở giai đoạn này sẽ là:

$$\tau_2 = \frac{1}{K} \ln \frac{\omega_{Kn2} - \omega_{cb}}{\omega_2 - \omega_{cb}} \quad (5-2)$$

ở đây K là hệ số sấy, phụ thuộc vào chế độ sấy và tính chất của vật liệu. Trên hình vẽ có thể thấy K là hệ số góc của đường thẳng, tức là:

$$K = \frac{N}{\omega_{Kn2} - \omega_{cb}} \quad (5-3)$$

$$\text{Đại lượng: } X = \frac{1}{\omega_{Kn2} - \omega_{cb}} \quad (5-4)$$

được gọi là hệ số sấy tương đối, phụ thuộc vào tính chất của vật liệu, khi đó ta có:

$$K = XN \quad (5-5)$$

Trong nhiều kết quả nghiên cứu cho thấy:

$$X = \frac{1,8}{\omega_0} \quad (5-6)$$

với ω_0 là độ ẩm ban đầu của vật xem như bằng độ ẩm bắt đầu quá trình tốc độ sấy không đổi ω_1

Vậy thời gian của cả quá trình sấy sẽ là:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_1 + \tau_2 = \frac{\omega_1 - \omega_{Kn2}}{N} + \frac{1}{K} \ln \frac{\omega_{Kn2} - \omega_{cb}}{\omega_2 - \omega_{cb}} \\ \text{hay } \tau &= \frac{1}{N} \left[(\omega_1 - \omega_{Kn2}) + \frac{1}{X} \ln \frac{\omega_{Kn2} - \omega_{cb}}{\omega_2 - \omega_{cb}} \right] \end{aligned} \quad (5-7)$$

Kết hợp với (5-3),(5-4),(5-6) và biến đổi cuối cùng ta có:

$$\tau = \frac{\omega_0 - \omega_{cb}}{N} - \frac{1}{XN} \{ 1 + \ln [X(\omega_2 - \omega_{cb})] \} \quad (5-8)$$

Như vậy, theo (5-8) để xác định thời gian sấy chúng ta cần biết độ ẩm ban đầu ω_0 (hay là ω_1), độ ẩm cuối cùng ω_2 (theo yêu cầu), độ ẩm cân bằng ω_{cb} và tốc độ sấy trong giai đoạn tốc độ sấy không đổi N.

Như đã biết, đường cong tốc độ sấy ở giai đoạn tốc độ sấy giảm dần có nhiều dạng khác nhau. Việc tuyến tính hóa trong giai đoạn này bởi một đoạn thẳng sẽ dẫn đến sai số đáng kể khi tính toán thời gian sấy. Để có kết quả chính xác hơn thì nên thực hiện tuyến tính hóa từng phần ở giai đoạn này.

5.2. CÁC PHƯƠNG PHÁP KHÁC

5.2.1. Phương pháp G.K.Philônenko

Trong phương pháp này thì biểu diễn chung cho cả quá trình sấy ta có phương trình sau:

$$-\left(\frac{1}{N} \frac{d\omega}{d\tau}\right) = \frac{(\omega - \omega_{cb})^m}{A + B(\omega - \omega_{cb})^m} \quad (5-9)$$

Tích phân (5-9) từ ω_1 đến ω_2 ta có :

$$\tau = \frac{1}{N} \left\{ \frac{A}{1-m} (\omega - \omega_{cb})^{1-m} + B(\omega_1 - \omega_2) \right\} \quad (5-10)$$

Khi $m=1$ thì :

$$\tau = \frac{1}{N} \left\{ A \ln \frac{\omega_1 - \omega_{cb}}{\omega_2 - \omega_{cb}} + B(\omega_1 - \omega_2) \right\} \quad (5-11)$$

Các giá trị A, B và m được xác định bằng thực nghiệm. Trong đó A và B phụ thuộc vào chiều dày của vật liệu, còn m phụ thuộc vào đặc trưng liên kết ẩm (khi liên kết mao dẫn thì $m=1$). Với một số vật liệu ta có bảng sau:

Bảng 5.1. Giá trị A, B, m trong công thức (5-9)

Vật liệu	A	B	m
Vải	28,5	0,73	1
Khoai tây	1200	-3	1
Củ cải	1000	-2	1
Cà rốt	1550	-2	1
Hành	1600	-3	1

5.2.2. Phương pháp N.P. Đacuchaep

Trong phương pháp này tác giả đưa ra quan hệ giữa độ ẩm và thời gian sấy như sau:

$$\omega = \omega_1 - \frac{\tau}{A + B\tau} \quad (5-12)$$

$$\text{hay } \frac{\tau}{\omega_1 - \omega} = A + B\tau \quad (5-13)$$

trong đó A, B là các hệ số phụ thuộc vào vật liệu và chế độ sấy.

Chúng ta thấy (5-13) là quan hệ tuyến tính. Vậy ta có thể dễ dàng xây dựng đồ thị với trục tung là $\frac{\tau}{\omega_1 - \omega}$, còn trục hoành là τ và xác định đường thẳng $\frac{\tau}{\omega_1 - \omega} = f(\tau)$ qua hai điểm. Điều này cho phép giảm đi nhiều khối lượng thí nghiệm so với các phương pháp khác.

Thời gian sấy khi đó sẽ là:

$$\tau = \frac{A(\omega_1 - \omega)}{1 - B(\omega_1 - \omega)} \quad (5-14)$$

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. *Trần Văn Phú.* Tính toán và thiết kế hệ thống sấy. Nhà xuất bản Giáo dục.2001.
2. *Hoàng Văn Chước.* Kỹ thuật Sấy. NXB Khoa học & Kỹ thuật.2003
3. *Nguyễn Văn May.* Giáo trình Kỹ thuật sấy nông sản thực phẩm. NXB Khoa học & Kỹ thuật.2002

MỤC LỤC

	<i>Trang</i>
<i>Lời nói đầu</i>	1
Chương 1 VẬT LIỆU ÂM	2
1.1.CÁC ĐẶC TRƯNG TRẠNG THÁI ÂM CỦA VẬT LIỆU	2
1.1.1.Độ ẩm tuyệt đối	
1.1.2.Độ ẩm toàn phần	
1.1.3.Độ chứa ẩm	
1.1.4.Nồng độ ẩm	
1.1.5.Độ ẩm cân bằng	
1.2.PHÂN LOẠI VẬT LIỆU ÂM VÀ ĐẶC TÍNH XỐP CỦA NÓ	3
1.2.1.Vật keo	
1.2.2.Vật xốp mao dẫn	
1.2.3.Vật keo xốp mao dẫn	
1.2.4.Đặc tính xốp của vật liệu ẩm	
1.3.ÂM TRONG VẬT LIỆU	4
1.3.1.Đặc trưng cơ bản của nước	
1.3.2.Qúa trình hấp phụ	
1.3.3.Sự hấp phụ trên bề mặt mao dẫn	
1.4.CÁC DẠNG VÀ NĂNG LƯỢNG LIÊN KẾT ÂM	7
1.4.1.Liên kết hóa học	
1.4.2.Liên kết hấp phụ	
1.4.3.Liên kết mao dẫn	
1.4.4.Liên kết thẩm thấu	
1.5.CÁC ĐẶC TRƯNG NHIỆT ĐỘNG CỦA VẬT LIỆU ÂM	8
1.5.1.Thế truyền ẩm	
1.5.2.Âm dung riêng	
1.5.3.Hệ số gradien nhiệt độ	
1.5.4.Hệ số dẫn thế truyền ẩm	
1.5.5.Hệ số dẫn ẩm	
1.6.CÁC ĐẶC TRƯNG NHIỆT VẬT LÝ CỦA VẬT LIỆU ÂM	11
1.6.1.Nhiệt dung riêng	
1.6.2.Hệ số dẫn nhiệt	
1.6.3.Hệ số dẫn nhiệt độ	

Chương 2 TÁC NHÂN SẤY	13
2.1.KHÔNG KHÍ ẨM	13
2.1.1.Khái niệm chung	
2.1.2.Các thông số đặc trưng	
2.1.3.Đồ thị I-d	
2.2.KHÓI LÒ	22
2.2.1.Nguyên lý hệ thống sấy bằng khói	
2.2.2.Phương pháp tính toán	
Chương 3. TRYỀN NHIỆT-TRUYỀN CHẤT TRONG QUÁ TRÌNH SẤY	25
3.1.Quá trình truyền âm trong vật liệu	25
3.2.Quá trình TĐN-TĐC giữa bề mặt vật liệu với môi trường	26
Chương 4.ĐỘNG HỌC QUÁ TRÌNH SẤY	28
4.1.ĐẶC ĐIỂM DIỄN BIẾN CỦA QUÁ TRÌNH SẤY	28
4.1.1.Giai đoạn tốc độ sấy không đổi	
4.1.2.Giai đoạn tốc độ sấy giảm dần	
4.2.NHỮNG QUY LUẬT CƠ BẢN CỦA QUÁ TRÌNH SẤY	29
4.2.1.Đường cong sấy	
4.2.2.Đường cong tốc độ sấy	
4.2.3.Đường cong nhiệt độ sấy	
4.3.PHÂN TÍCH QUÁ TRÌNH SẤY	33
4.3.1. Giai đoạn tốc độ sấy không đổi	
4.3.2.Giai đoạn tốc độ sấy giảm dần	
Chương 5. CÁC PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH THỜI GIAN SẤY	35
5.1.PHƯƠNG PHÁP A.V.LUKOP	35
5.2.CÁC PHƯƠNG PHÁP KHÁC	37
5.2.1.Phương pháp G.K.Philanhenco	
5.2.2.Phương pháp N.P. Đacuchaep	
TÀI LIỆU THAM KHẢO	38