

تجفيف المواد الغذائية

Food Drying

إعداد

د. محمد فكرى الطحلاوى

دكتورة في هندسة تصنيع الأغذية، كلية الهندسة، جامعة بوترا الماليزية

moh.eltahlawy@fagr.bu.edu.eg

محتويات المحاضرة

مقدمة عن التجفيف وأهميته

الرطوبة في المادة الغذائية

الطرق الأساسية لتجفيف المنتجات الغذائية

آليات حركة الرطوبة خلال المواد الغذائية

سلوك معدل التجفيف

أنظمة التجفيف وتصميمها

حساب زمن التجفيف

التجفيد

مقدمة عن التجفيف وأهميته

تعريف التجفيف:

عملية إزالة الماء من المادة الغذائية الى المستوى الأمن لتخزينها

يسمح بزيادة العمر التخزيني (زيادة فترة التخزين) بدون تلف والحفاظ على القيمة الغذائية بقدر الإمكان.

خفض الحجم الكلي للمنتج مما يقلل من تكاليف التخزين والشحن والنقل

يسمح للمزارع بالحصول على مميزات أسعار المنتج المرتفع في بداية الموسم أو تخزينه حتى يرتفع السعر مرة أخرى في نهاية الموسم.

أنواع الرطوبة في المادة الغذائية

رطوبة التآين

- عبارة عن الماء المرتبط مع مكونات المادة بروابط كيميائية ويعتبر هذا الماء جزء من أجزاء المادة وهو غير متاح للتجفيف ولا يدخل ضمن الماء المستخدم في تقدير المحتوى الرطوبي للمادة.

الرطوبة المرتبطة

- يرتبط هذا النوع من بروابط طبيعية أو فيزيائية عادة بواسطة قوى سطحية أكبر من القوى المسببة لتكثيف الماء وإزالتها أمر غير مرغوب فيه.

الرطوبة الحرة

- الماء الغير مرتبط ويسمى أحياناً ماء التكثيف والحرارة اللازمة لتجفيف تلك الرطوبة تتساوى مع الحرارة اللازمة لتبخير الماء العادي عند نفس درجة الحرارة.

الطرق الرئيسية للتجفيف

التجفيد

- في التجفيد تجمد المادة أولاً ثم يتسامى بخار الماء من المادة المجمدة

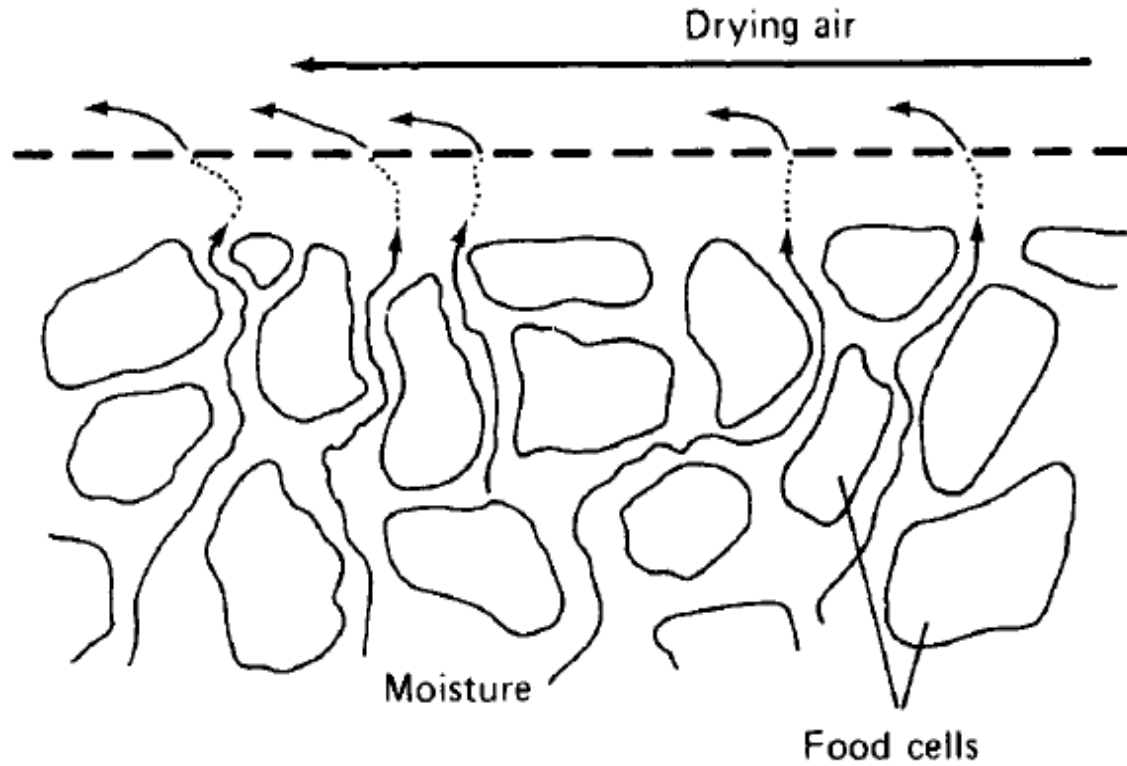
التجفيف تحت تفريغ

- يتم استغلال حقيقة أن تبخير الماء يحدث بسرعة أكبر تحت الضغوط المنخفضة مقارنة بالضغوط الكبيرة. حيث تزداد الحرارة الكامنة للتبخير مع تقليل الضغط.

التجفيف بالهواء تحت الضغط الجوي العادي

- يتم تزويد الغذاء بالحرارة اللازمة لتبخير الماء إما بواسطة هواء ساخن أو أسطح ساخنة وفي هذه الحالة فإن الماء يزال كبخار ماء محمولا مع الهواء المحيط بالمادة الغذائية.

آليات حركة الرطوبة في المواد الغذائية



١. انتقال الحرارة الى المادة لإمدادها بالحرارة الكاملة اللازمة للتبخير.

٢. حركة الماء أو بخار الماء خلال المادة الغذائية الى السطح تم تبخير الماء على السطح

وتتم حركة الرطوبة داخل المنتج المنتج بإحدى الآليات الآتية:

١- حركة السوائل بفعل القوى الشعرية.

٢- انتشار السوائل.

٣- الإنتشار السطحي.

٤- انتشار بخار الماء.

أنظمة التجفيف

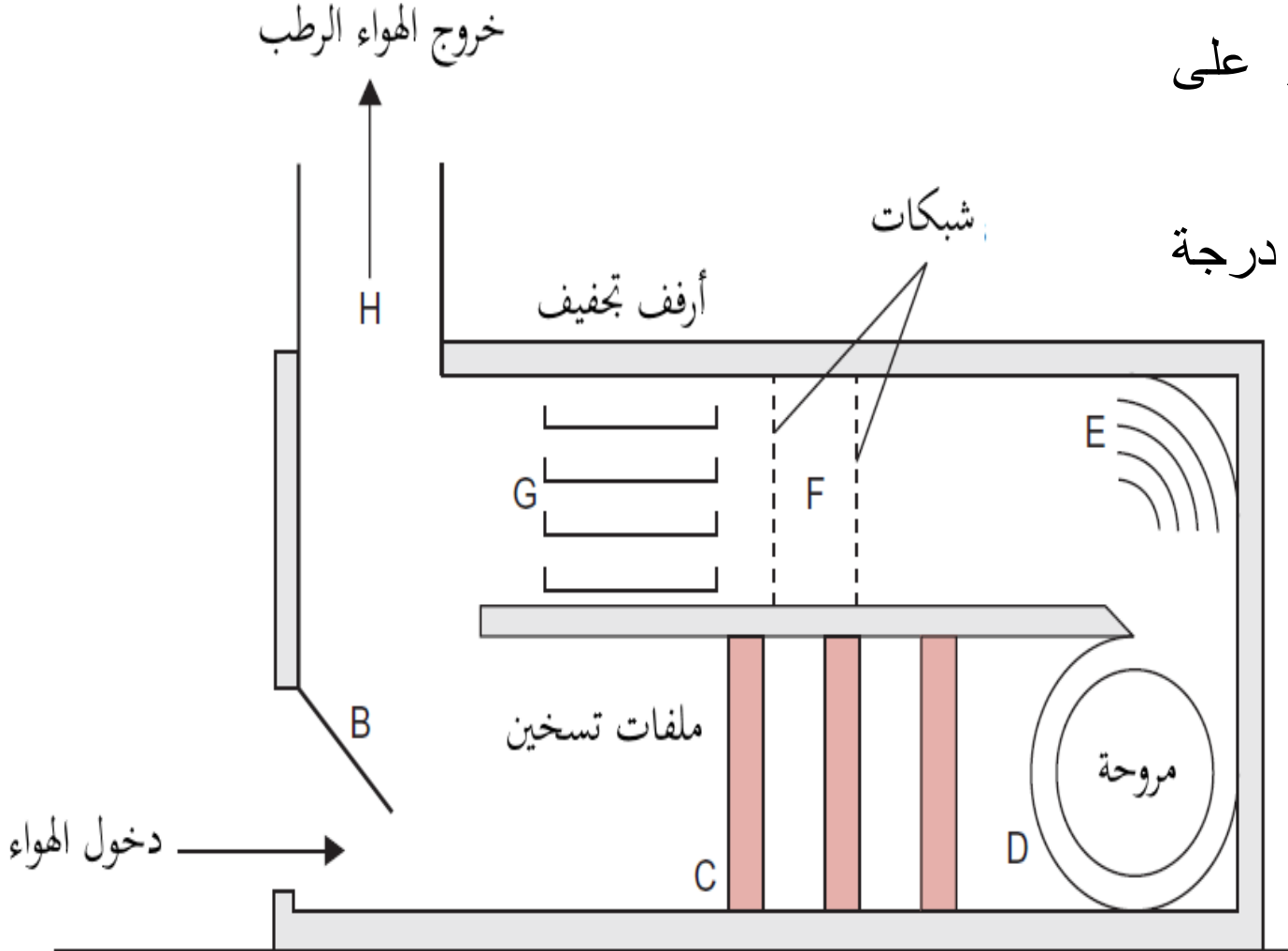
الأجزاء الرئيسية للمجفف

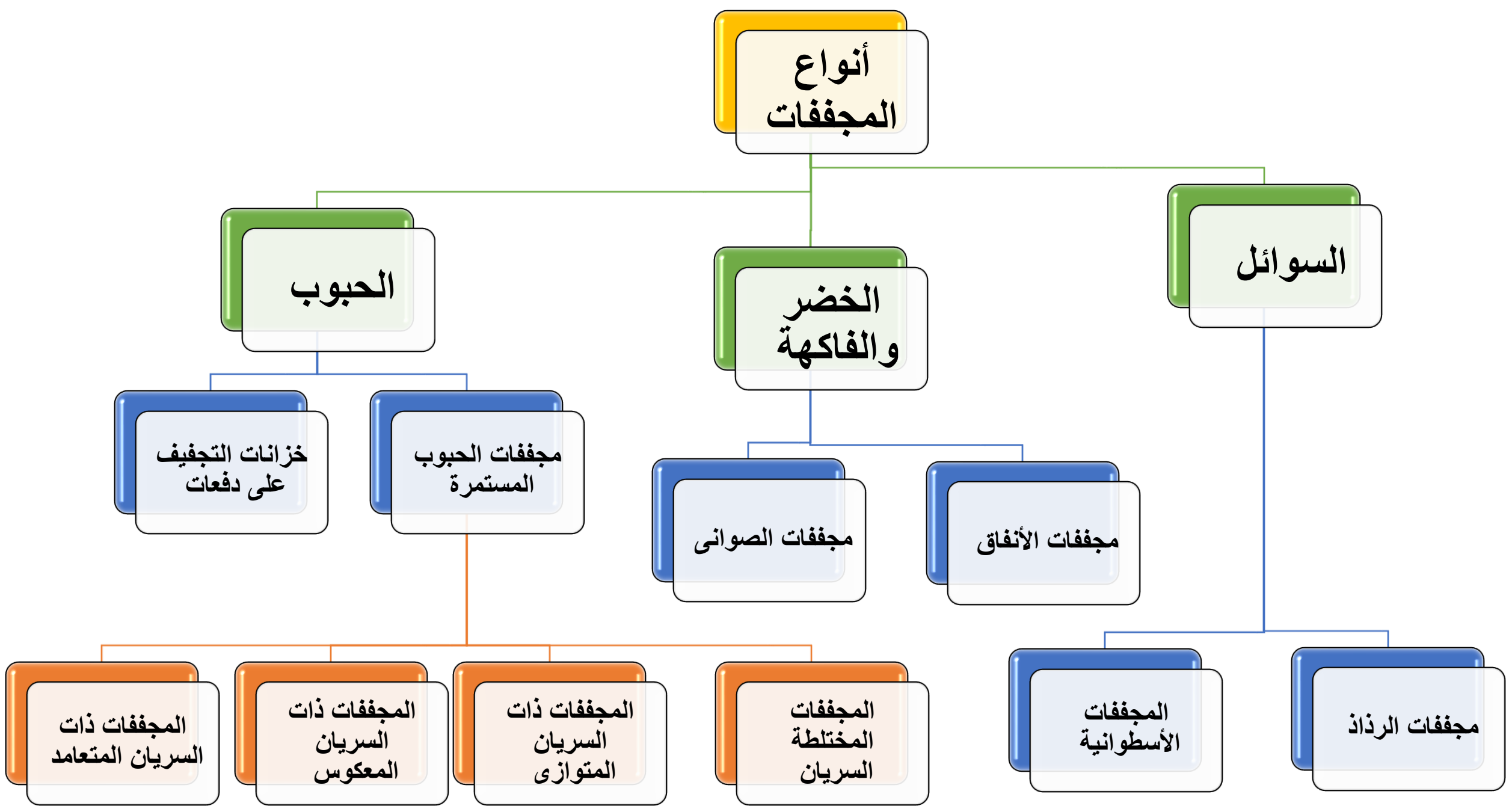
١. المروحة: تستخدم في دفع تيار من الهواء ليمر على السخان ثم خلال المادة الغذائية.

٢. السخان: لإضافة كمية من الحرارة للهواء لرفع درجة حرارته الجافة إلى درجة الحرارة المناسبة للتجفيف.

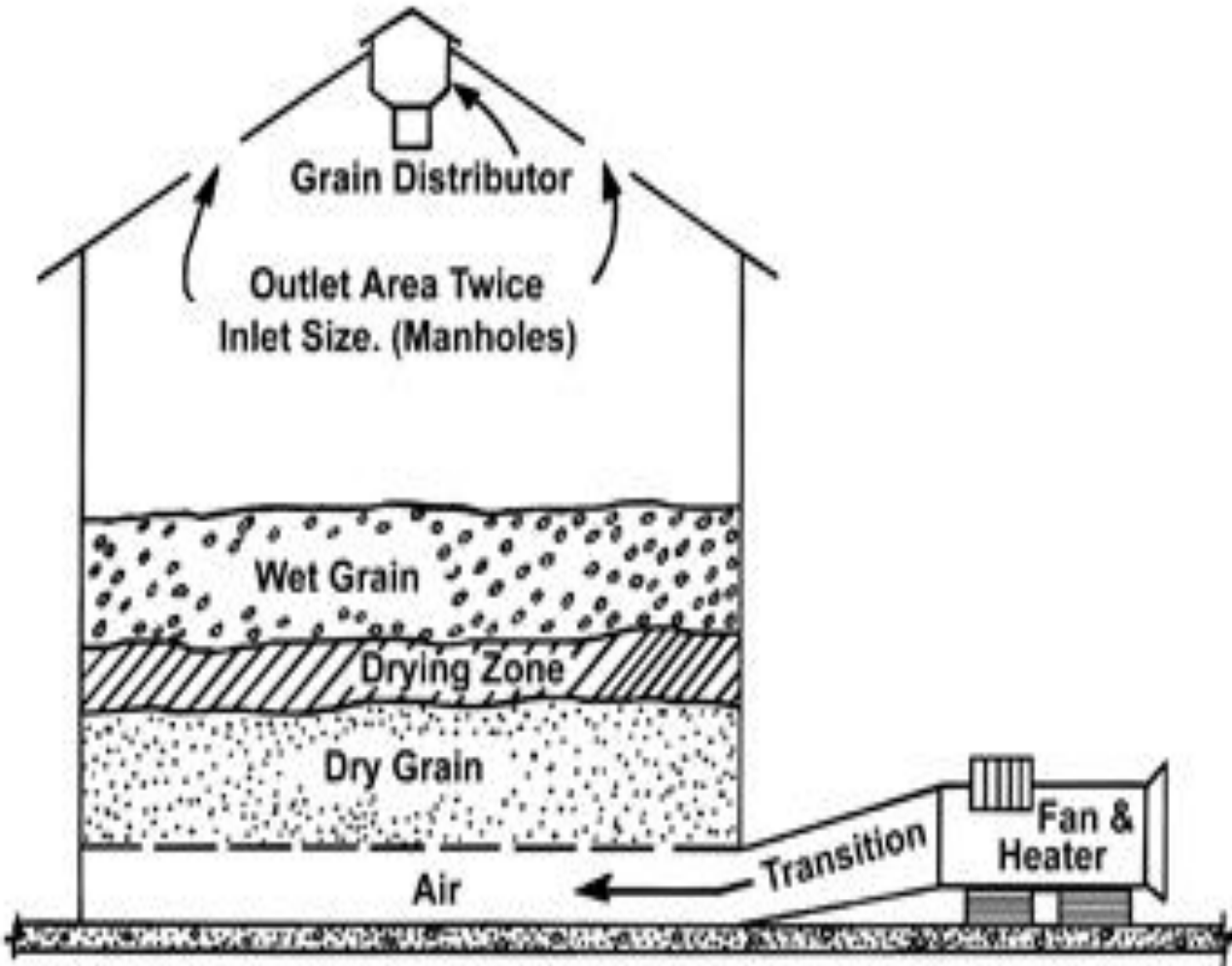
٣. غرفة التجفيف: وهو المكان الذي يحتوى على المادة الغذائية أثناء تجفيفها.

٤. أجزاء إضافية: أجهزة التحكم أجهزة التحكم وأجهزة الملى والتفريع والتجميع

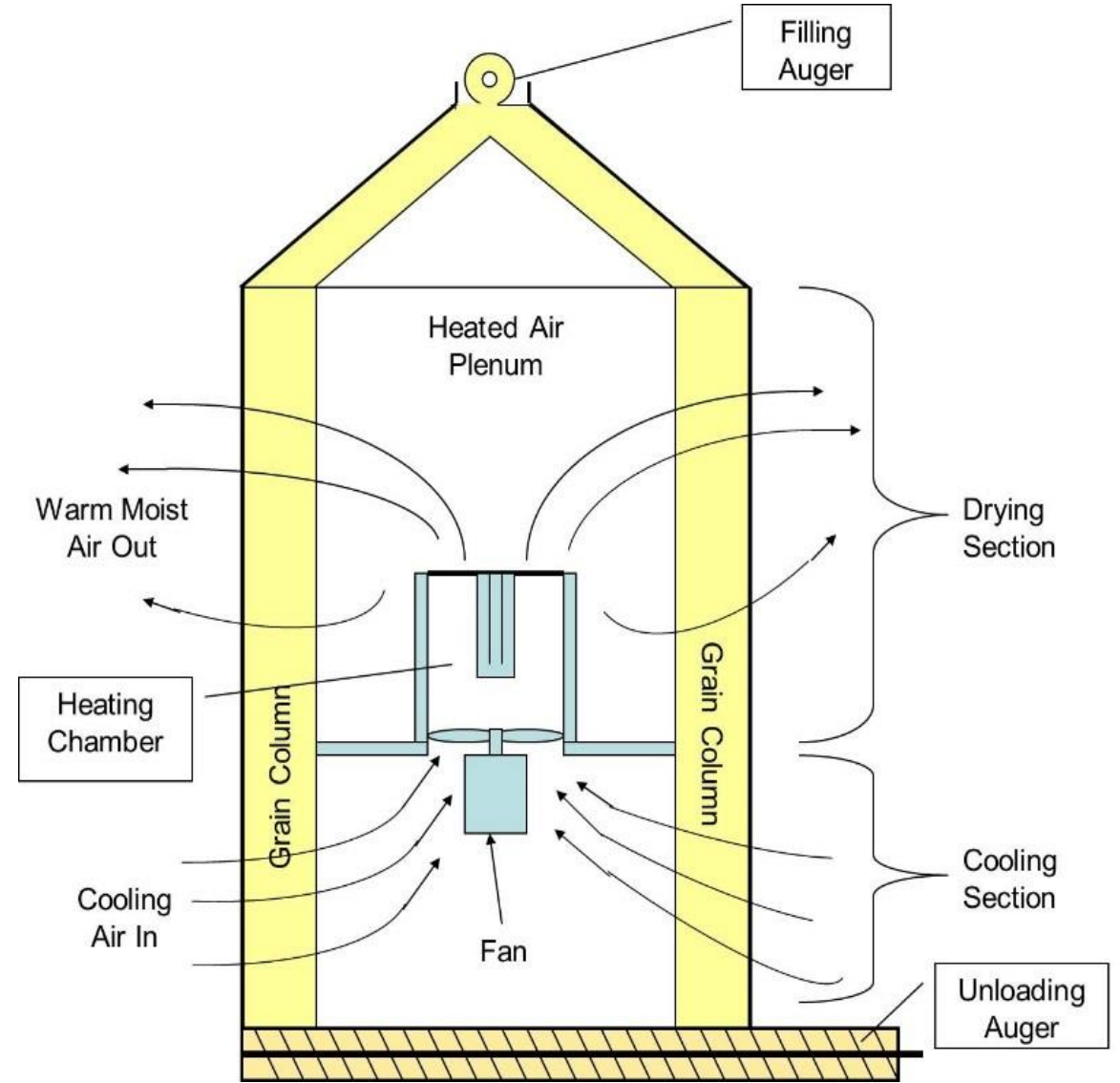




أنظمة التجفيف

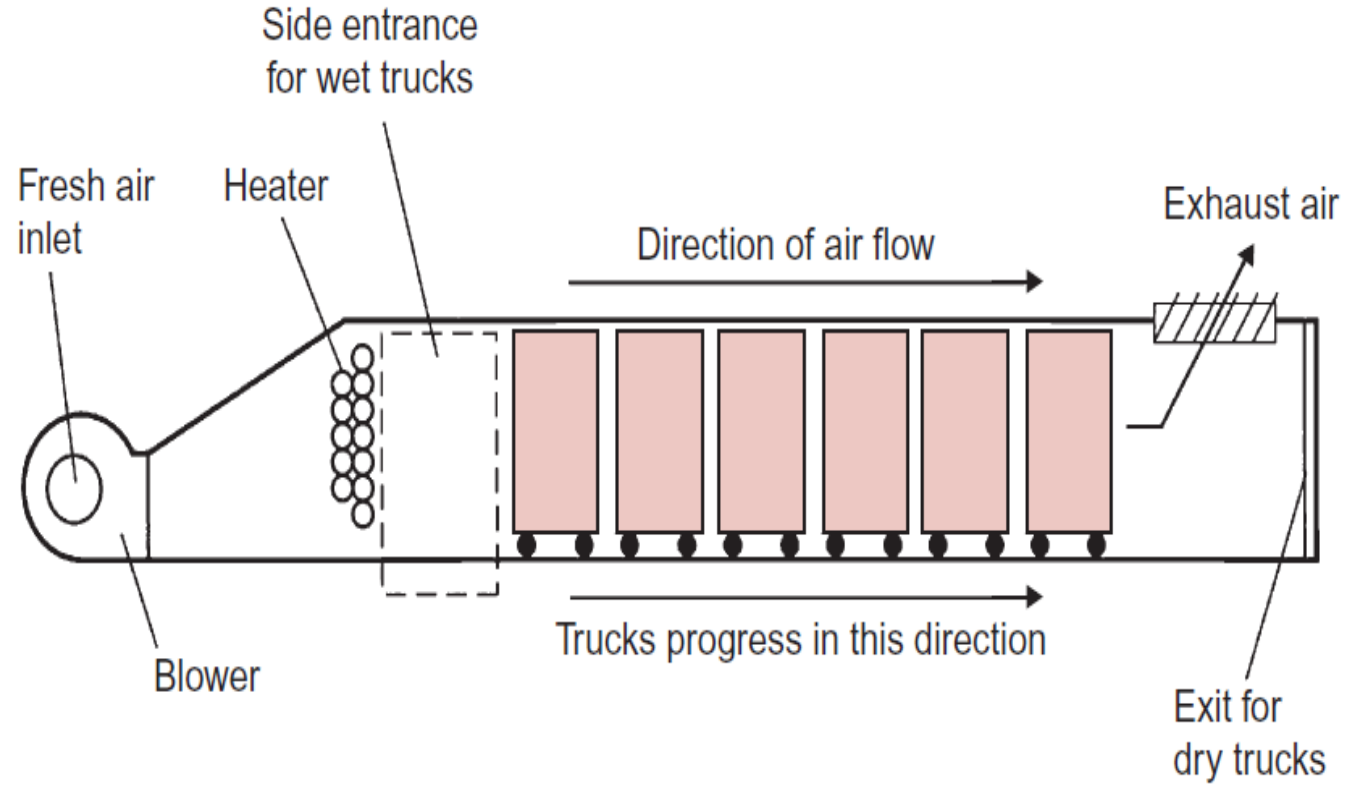
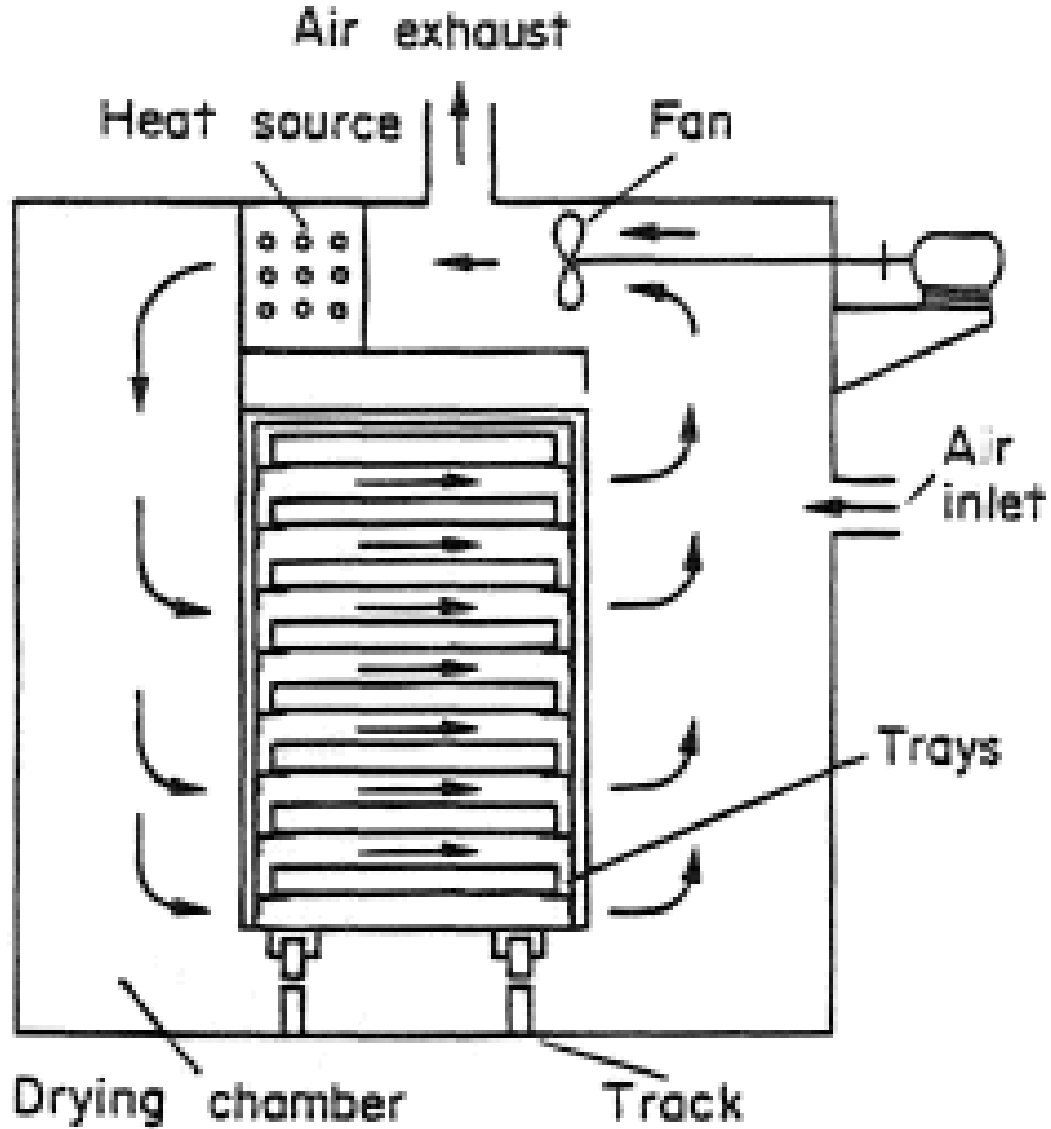


خزان تجفيف على دفعات



مجفف حبوب مستمر

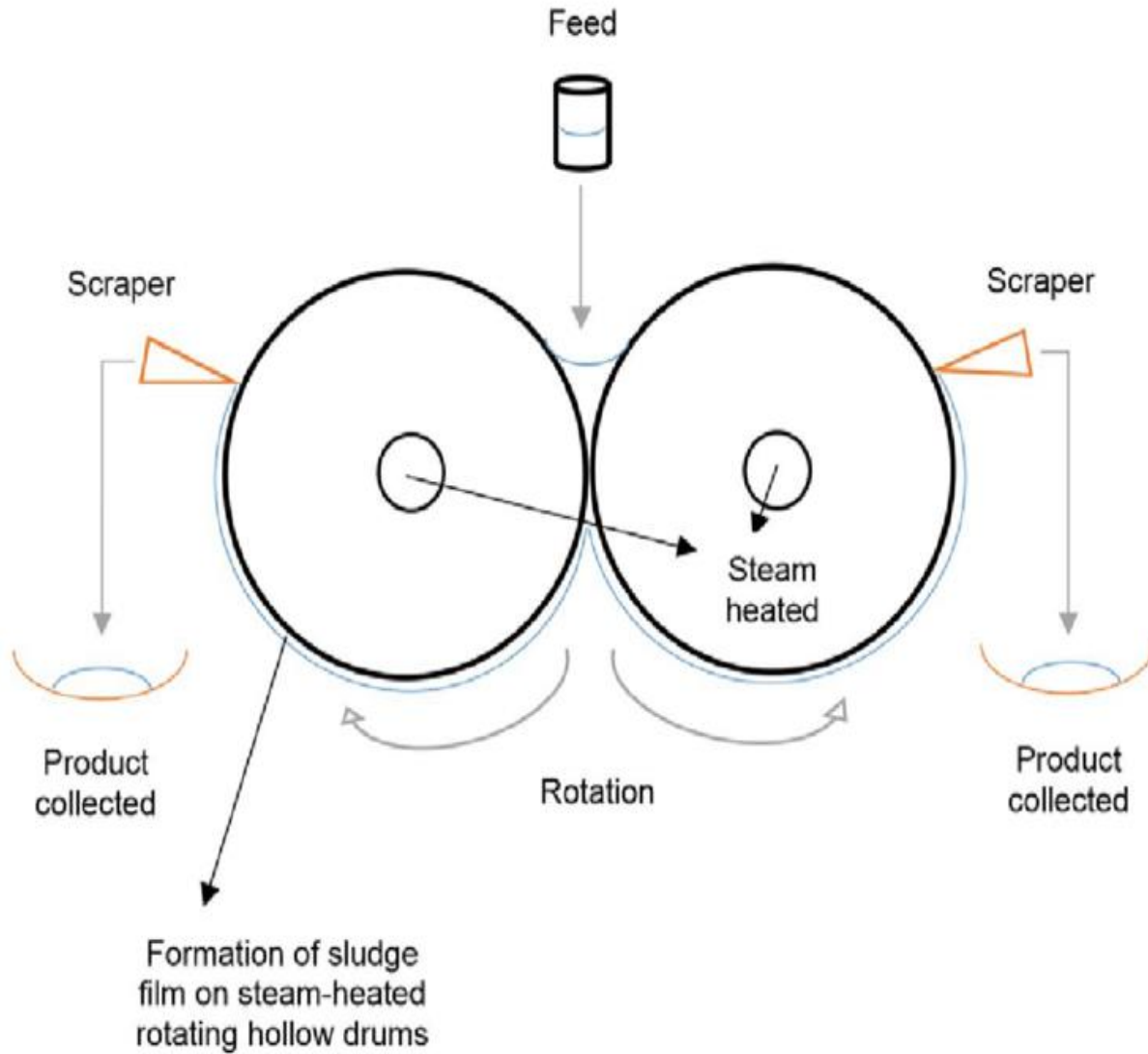
أنظمة التجفيف



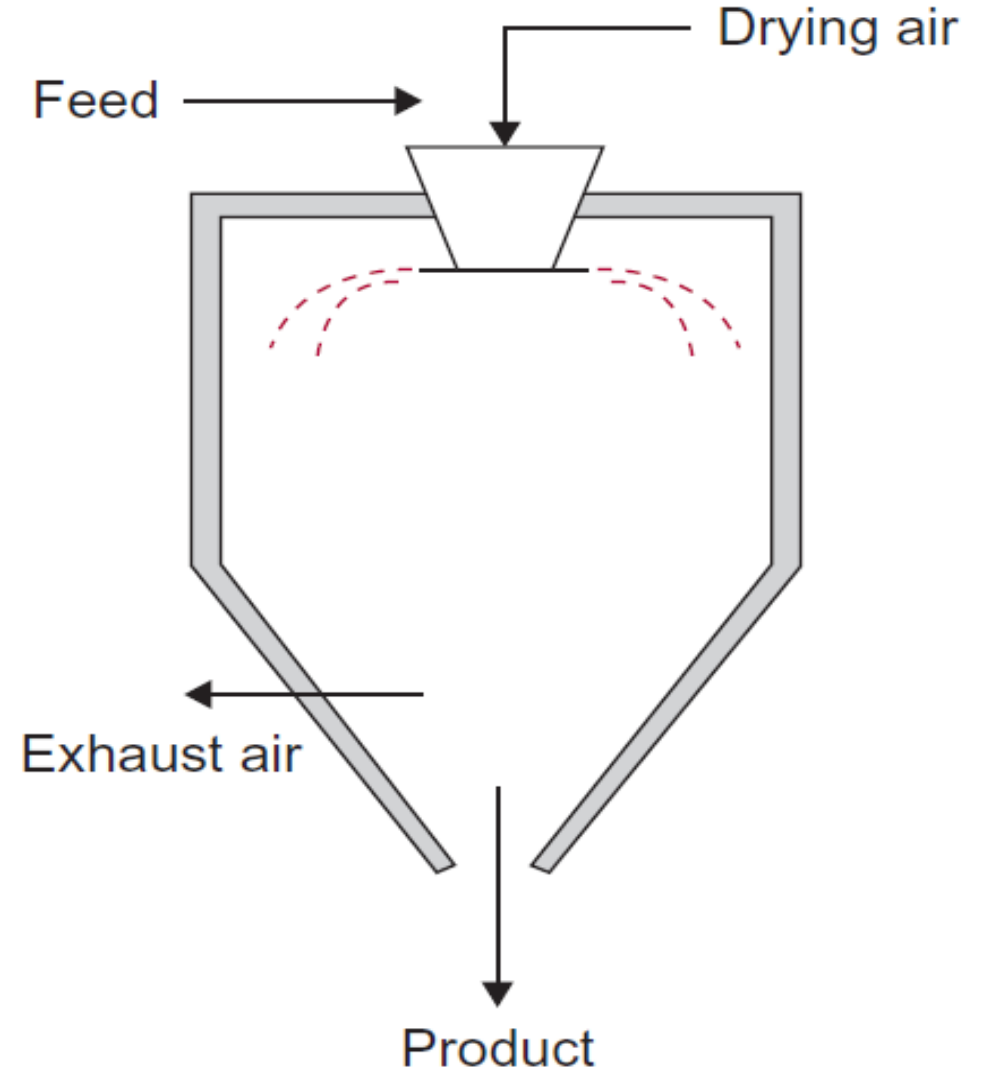
مجفف الأنفاق

مجفف الأرفف (الصواني)

أنظمة التجفيف

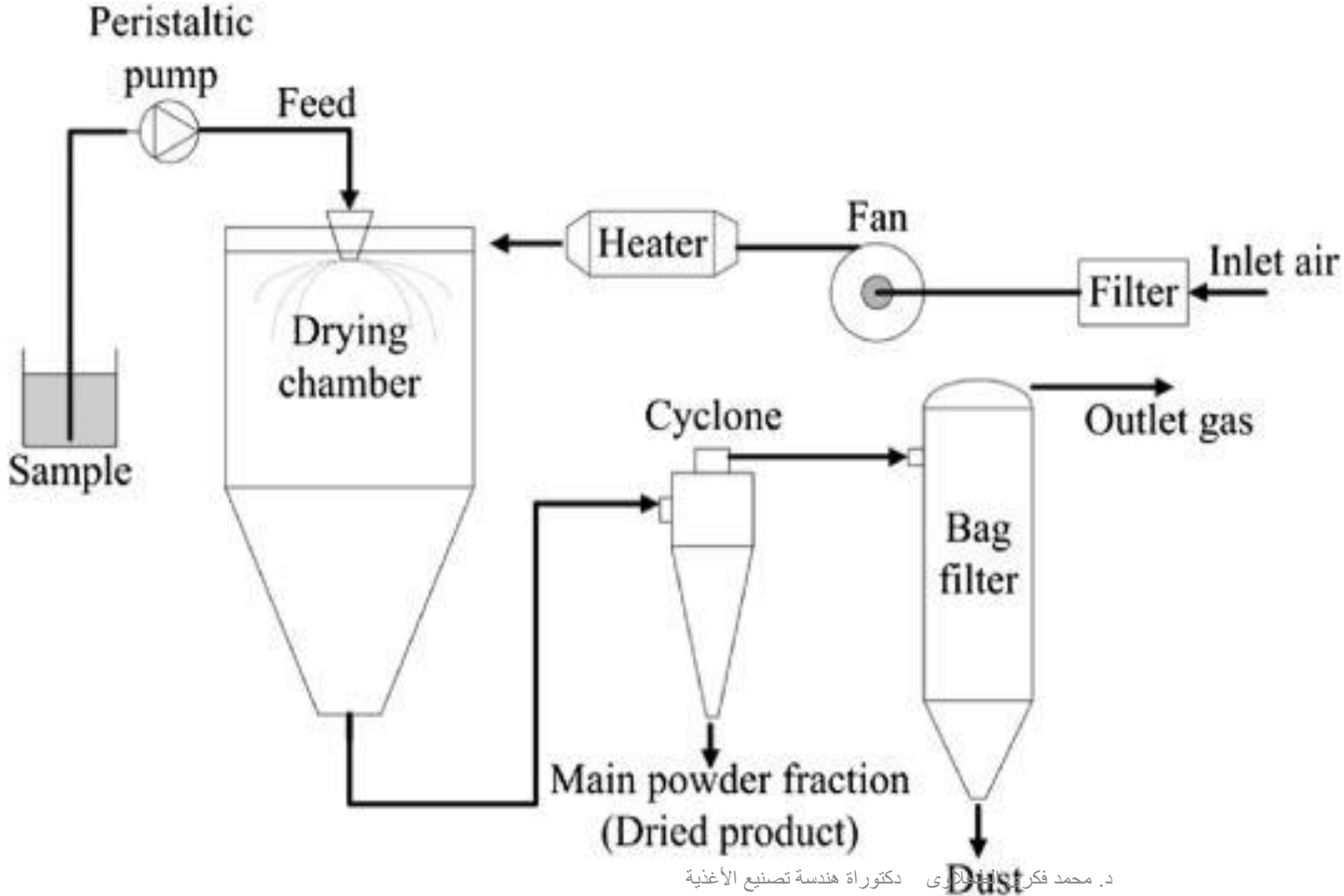


مجفف الأسطوانات الدورانية



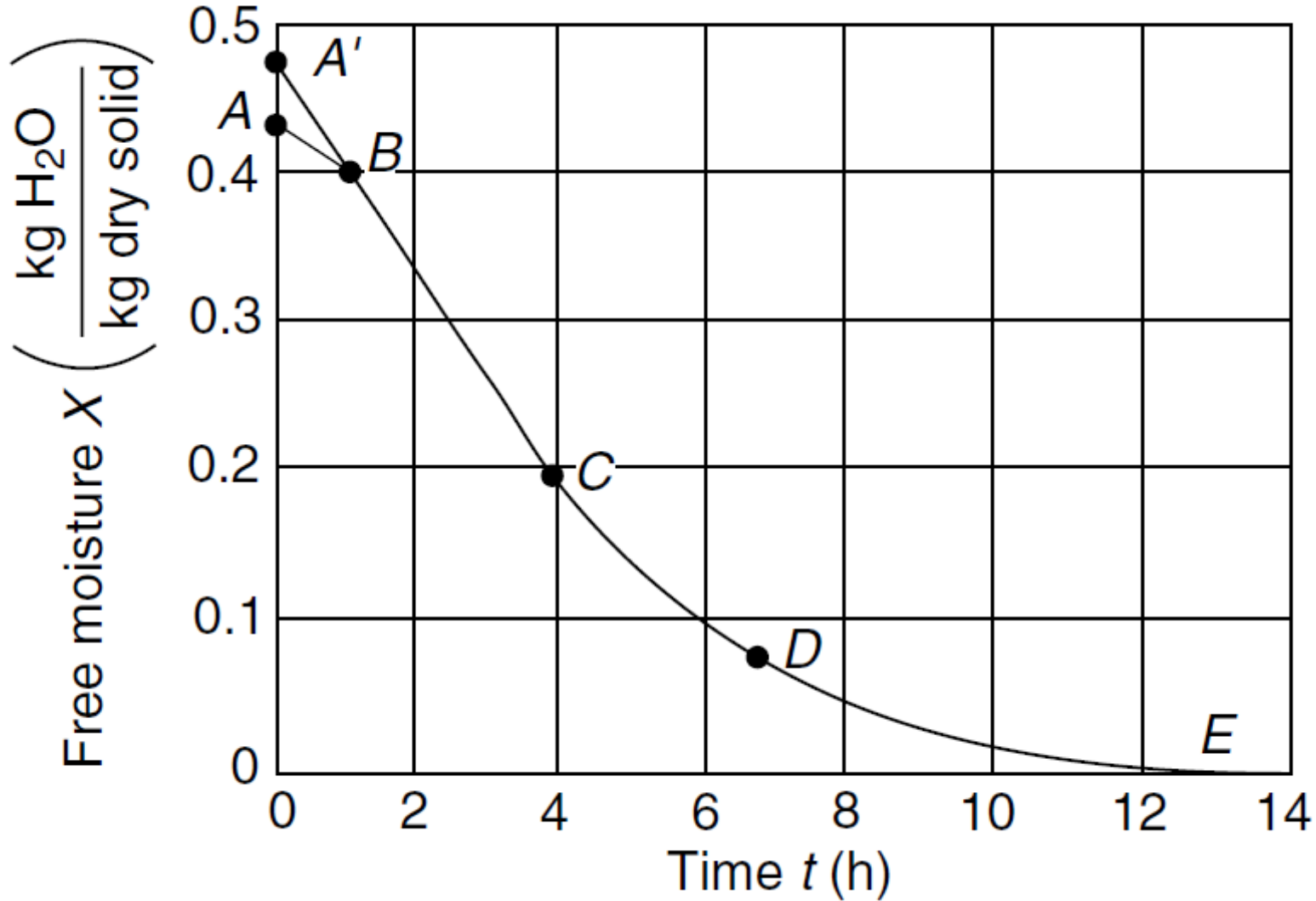
مجفف الرذاذ

أنظمة التجفيف



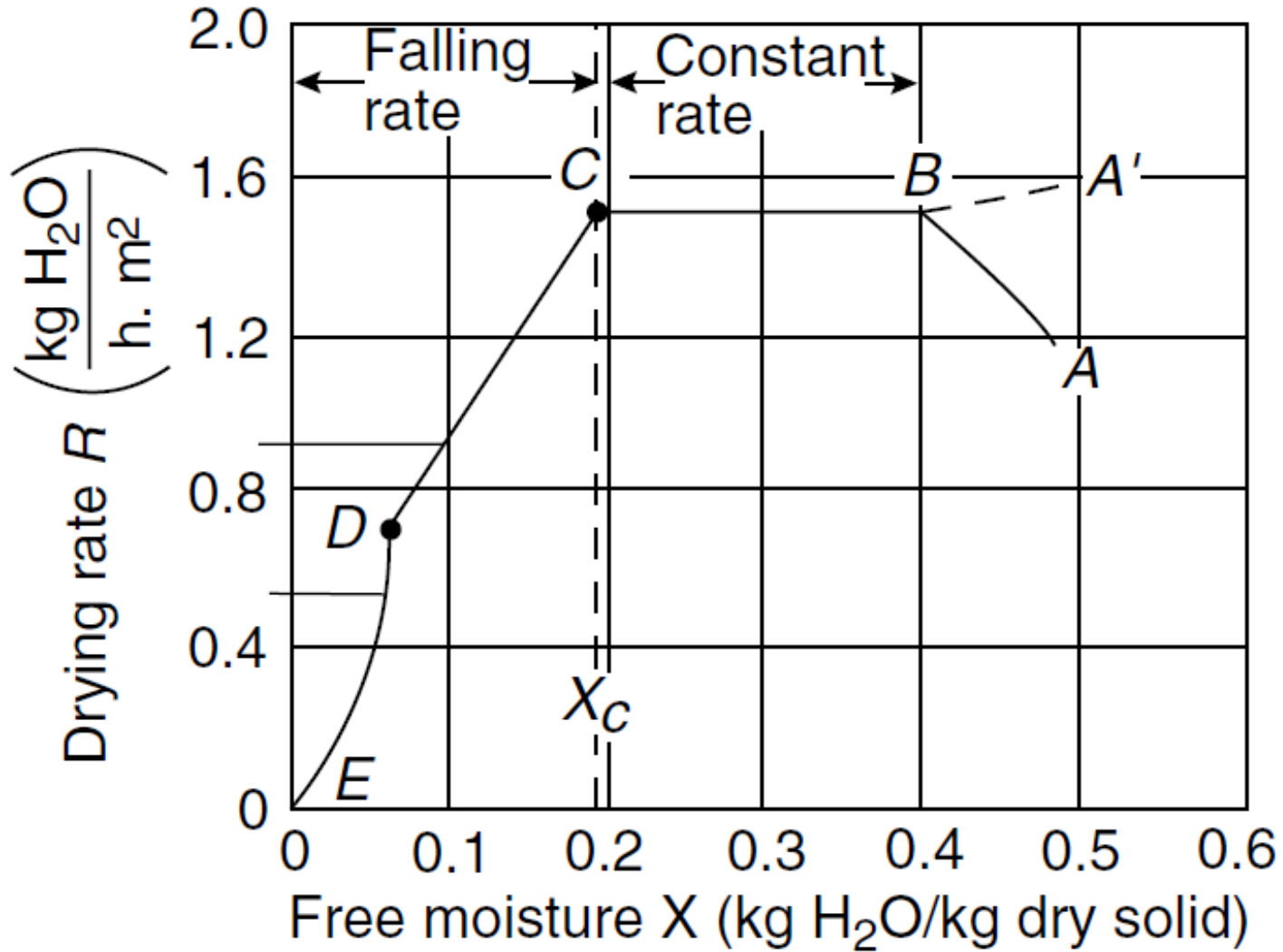
مجفف الرذاذ

سلوك معدل التجفيف



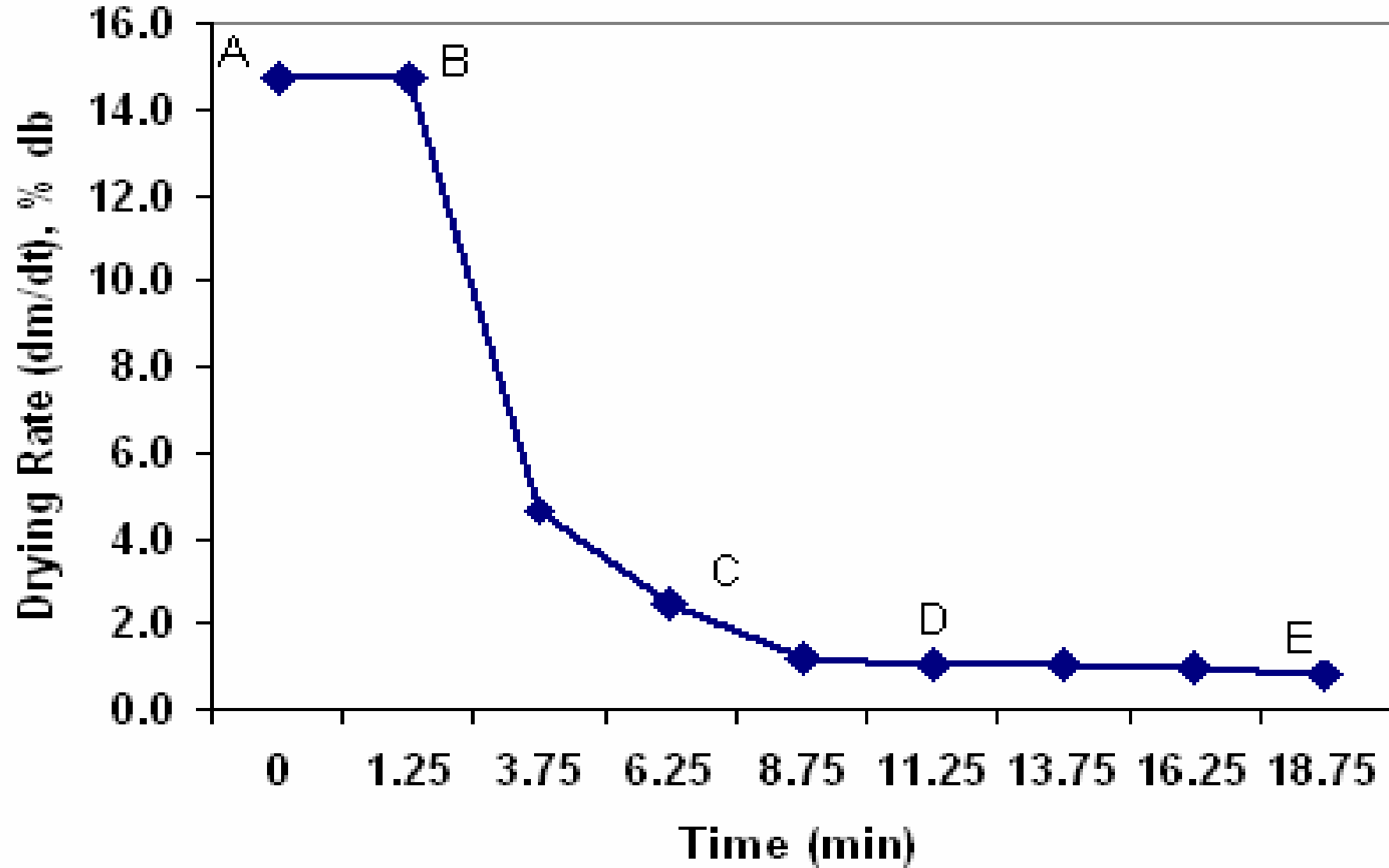
العلاقة بين المحتوى الرطوبي وزمن التجفيف

سلوك معدل التجفيف



العلاقة بين المحتوى الرطوبي ومعدل التجفيف

سلوك معدل التجفيف



العلاقة بين معدل التجفيف وزمن التجفيف

مراحل عملية التجفيف

الفترة الابتدائية

• فترة أولية قصيرة AB في الأشكال السابقة وفيها يتم تعادل بين المادة وظروف التجفيف ويمكن إهمالها في معظم الحالات.

فترة المعدل الثابت

• يكون هناك فائض من الرطوبة الحرة عند سطح المادة الرطبة ونقل الرطوبة الى السطح بالقوى الشعيرية أو قوى الإنكماش يكون كافيا لتعويض الفقد من التبخر لفترة زمنية معينة وهي الفترة BC في المنحنيات السابقة.

فترة المعدل المتناقص

• أثناء تلك الفترة تنتقل الرطوبة من الداخل الى السطح بسرعة غير كافية لجعل السطح مشبعا وسيتناقص معدل التجفيف باستمرار طالما أن عملية التجفيف مستمرة تبدأ تلك المرحلة بنهاية مرحلة التجفيف بمعدل ثابت عند النقطة C ويسمى المحتوى الرطوبي عند تلك النقطة بالمحتوى الرطوبي الحرج، يبدأ معدل التجفيف بالتناقص باستمرار عملية التجفيف (أى باستمرار خفض المحتوى الرطوبي) الى أن يقترب من الصفر عن النقطة E والتي يسمى المحتوى الرطوبي عندها المحتوى الرطوبي المتوازن M_e

المحتوى الرطوبي في المواد الغذائية

المحتوى الرطوبي

المحتوى الرطوبي على
أساس رطب (m)

$$m = (W_m / W_t) * 100$$

المحتوى الرطوبي على
أساس جاف (M)

$$M = (W_m / W_d) * 100$$

العلاقة بين
المحتويات الرطوبية

$$m = (100M / (100 + M)) * 100$$

$$M = (100m / (100 - m)) * 100$$

حسابات زمن التجفيف

مرحلة التجفيف بمعدل ثابت

$$DR_c = \frac{dM}{dt} = \frac{M_o - M_c}{t_c} = \frac{hA(T_a - T_w)}{LHV}$$

$$t_c = \frac{LHV(M_o - M_c)}{hA(T_a - T_w)}$$

حيث :

dM / dt : معدل فقد الرطوبة لكل وحدة من المادة الصلبة ($kg_w / kg_{d.s}$)

LHV : الحرارة الكامنة للتبخير (kJ/kg)

T_a : درجة حرارة الهواء $^{\circ}C$

T_w : درجة حرارة التشبع أو درجة حرارة سطح المادة

h : معامل انتقال الحرارة بالحمل (وات / متر. 2 كلفن)

A : مساحة سطح المادة الغذائية ($م^2$)

حسابات زمن التجفيف

مرحلة التجفيف بمعدل متناقص

$$DR_F = \frac{dM}{dt} = \frac{M_o - M}{M_o - M_e} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \exp\left(\frac{-D\pi^2 t}{R^2}\right)$$

$$t_F = \frac{4X^2}{\pi^2 D} \ln \left[\frac{8}{\pi^2} \left(\frac{M_o - M_e}{M - M_e} \right) \right]$$

حيث

X عبارة عن البعد المميز للمادة وهي نصف السمك للشريحة، نصف قطر للكرة والإسطوانة

D عبارة عن معامل الانتشار للبخر

M_o عبارة عن المحتوى الرطوبي الابتدائي على أساس جاف، M هي المحتوى الرطوبي على أساس جاف عند أي زمن

M_e عبارة عن المحتوى الرطوبي المتوازن على أساس جاف ونظرا لصغر قيمته فيمكن تجاهله

حسابات زمن التجفيف

تقدير زمن التجفيف للمجففات المستمرة

عند عمل ائزان الكتلة على المجفف فإن

$$W_d (M_1 - M_2) = G (H_{a2} - H_{a1})$$

حيث:

W_d : معدل سريان المادة الجافة في المجفف، G معدل سريان الهواء

$$t = \frac{G W_d''}{K_m W_d} \ln \frac{(H_w - H_{a2})}{(H_w - H_{a1})}$$

$\frac{W_d}{A} = W_d''$ وهى تعادل كمية المادة الجافة في المجفف لكل 1 متر مربع من سطح التجفيف

$K_m = 0.8 \text{ h}$: معامل انتقال الكتلة kg/m^2

H_a : الرطوبة المطلقة للهواء $\text{kg}_w / \text{kg}_{\text{dry air}}$

H_w : الرطوبة المطلقة عند التشبع $\text{kg}_w / \text{kg}_{\text{dry air}}$

المادة الطازجة - M_1 ، W_{m1}

الهواء الخارج (هواء

مجفف + رطوبة)

G, H_2, T_{db2}

المجفف المستمر

الهواء الداخل

G, H_1, T_{db1}

المادة الجافة - M_2 ، W_{m2}

حسابات زمن التجفيف

عند عمل ائزان الطاقة على المجفف فإن:

$$G h_2 + W_d * h_{m1} = G . h_1 + W_d * h_{m2}$$

ائالبي الماة العذائفة h_m عند الدءول والءروج ءءسب كما يلى

$$h_m = C_{ps} (T_s - T_o) + M C_{pw} (T_s - T_o)$$

($T_s - T_o$) ءرءة الءرارة فوء المسءوى المرءعى (صفر ءرءة مءوءة)

C_{pw} الءرارة النوعفة للماء، C_{ps} الءرارة النوعفة للماة العذائفة، M المءءوى الرءوبى للماة على أساس ءاف.

حسابات زمن التجفيف

تقدير زمن التجفيف لأجهزة التجفيف بالرداذ

ويعمل ائزان الكتلة للمنتج نجد أن

وزن المادة الطازجة الداخلة = وزن المادة المجففة + وزن الرطوبة المبخرة

$$W_f = W_p + \Delta W_w$$

W_f : معدل دخول المادة الطازجة الى المجفف kg/s

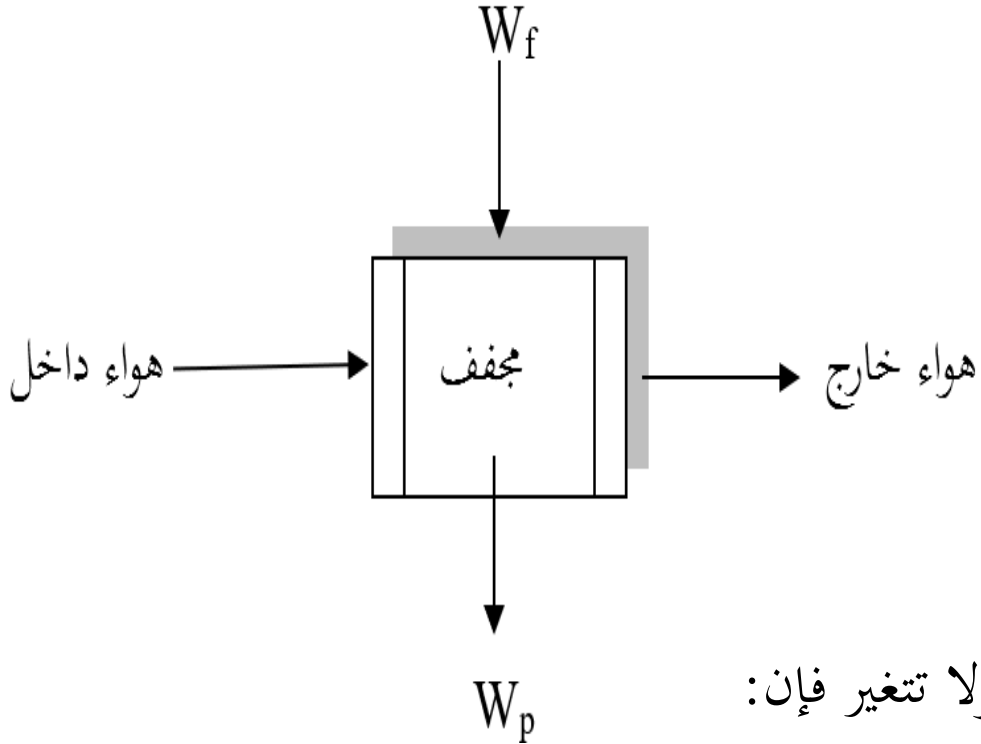
W_w : معدل الإنتاج للمادة المجففة kg/s

ΔW_w : هي وزن المادة المزالة كنتيجة لعملية التجفيف

وحيث أن الوزن الجاف للمواد الداخلية والخارجية من المجفف W_d تظل ثابتة ولا تتغير فإن:

$$W_d = W_f (1 - m_1) = W_p (1 - m_2)$$

حيث m_1, m_2 هي المحتوى الرطوبي للمادة على اساس رطب قبل وبعد التجفيف



حسابات زمن التجفيف

اتزان الطاقة في المجفف

الحرارة التي فقدها الهواء = الحرارة التي إكتسبها المنتج + الحرارة المستخدمة في تبخير الماء
معادلة اتزان الطاقة الساقطة نفترض عدم وجود فقد حرارى من المجفف الى الوسط

$$(E_{ai} - E_{ao}) = (E_p - E_f) + E_{evap}$$

حيث :

E_{ai} : المحتوى الحرارى للهواء الداخلى الى المجفف

E_{ao} : المحتوى الحرارى للهواء الخارج من المجفف

E_f : المحتوى الحرارى للمادة الداخلة الى المجفف (التغذية)

E_p : محتوى الحرارى للمادة المجففة (المنتج)

E_{evap} : الحرارة الكامنة للتبخير

حسابات زمن التجفيف

ولتقدير المحتوى الحرارى فإننا سوف نستخدم درجة الصفر المئوى كمستوى مرجعى لمحتوى الطاقة كما يلى:

$$E_{ai} = W_a * C_{p_{ai}} * (T_{ai} - 0)$$

$$E_{ao} = W_a * C_{p_{ai}} * (T_{ai} - 0)$$

$$E_f = W_f * C_{p_f} * (T_f - 0)$$

$$E_p = W_p * C_{pp} * (T_p - 0)$$

$$E_{evap} = \Delta W_w * LHV$$

حيث :

W_f : وزن المادة الطازجة الداخلة الى المجفف (التغذية)

W_p : وزن المادة المجففة الخارجة من المجفف (المنتج)

LHV : الحرارة الكامنة للتبخير

ΔW_w : وزن الرطوبة المزالة اثناء التجفيف

W_a : معدل سريان الهواء الداخلى والخارج من المجفف وهى ثابتة

C_{ao}, C_{ai} : الحرارة النوعية للهواء الداخلى والخارج

حسابات زمن التجفيف

$$C_{p_{ai}} = 1.005 + 1.88 H_i$$

$$C_{p_{ao}} = 1.005 + 1.88 H_o$$

أما الحرارة النوعية للمادة الطازجة (C_{pf}) وللمادة (C_{pp}) فهي تقدر كدالة في المحتوى الرطوبي على أساس رطب (m) تبعا لمعادلة سبيل كما يلي.

$$C_p = 0.837 + 3.349 * m$$

وبالتالى يكون

$$C_{pf} = 0.837 + 3.349 * m_f$$

$$C_{pp} = 0.837 + 3.349 * m_p$$

ويقدر المحتوى الرطوبي للمادة الطازجة (m_f) وللمادة المجففة (m_p) على أساس رطب كنسبة مئوية.

زمن التجفيف في فترة المعدل الثابت $t_c = \frac{\rho_L \times LHV \times d_o^2}{8 k (T_a - T_w)}$

زمن التجفيف في فترة معدل التجفيف المتناقص $t_f = \frac{\rho_L \times d_c \times LHV (m_c - m_e)}{6 h \times \Delta T_{avg}}$

$$t = t_c + t_f$$

حيث :

ρ_L : كثافة المادة السائلة (التغذية) ، d_c : قطر الحبيبة أثناء فترة المعدل المتناقص .

d_o : قطر القطرة بعد التركيز مباشرة وقبل التجفيف

LHV : الحرارة الكامنة للتبخير

k : معامل التوصيل الحرارى للبخار أو الهواء ، $h = 2 k / d_c$

T_a : درجة حرارة الهواء الجافة ، ΔT_{avg} : فرق درجات الحرارة الجافة والرطوبة مقسوما على ٢

T_w : درجة حرارة الهواء الرطبة

P_p : كثافة المادة المجففة (المنتج)

m_e : المحتوى الرطوبي المتوازن (على أساس رطب)

m_c : المحتوى الرطوبي الحرج (على أساس رطب)

التجفيد

التجفيد (أو التجفيد بالتجميد)

هى عملية إزالة الرطوبة من المنتج بالتسامى (sublimation) مباشرة من الحالة المجمدة (الصلبة)

المميزات

هى عدم وجود الإنكماش فالمادة لا تتكمش

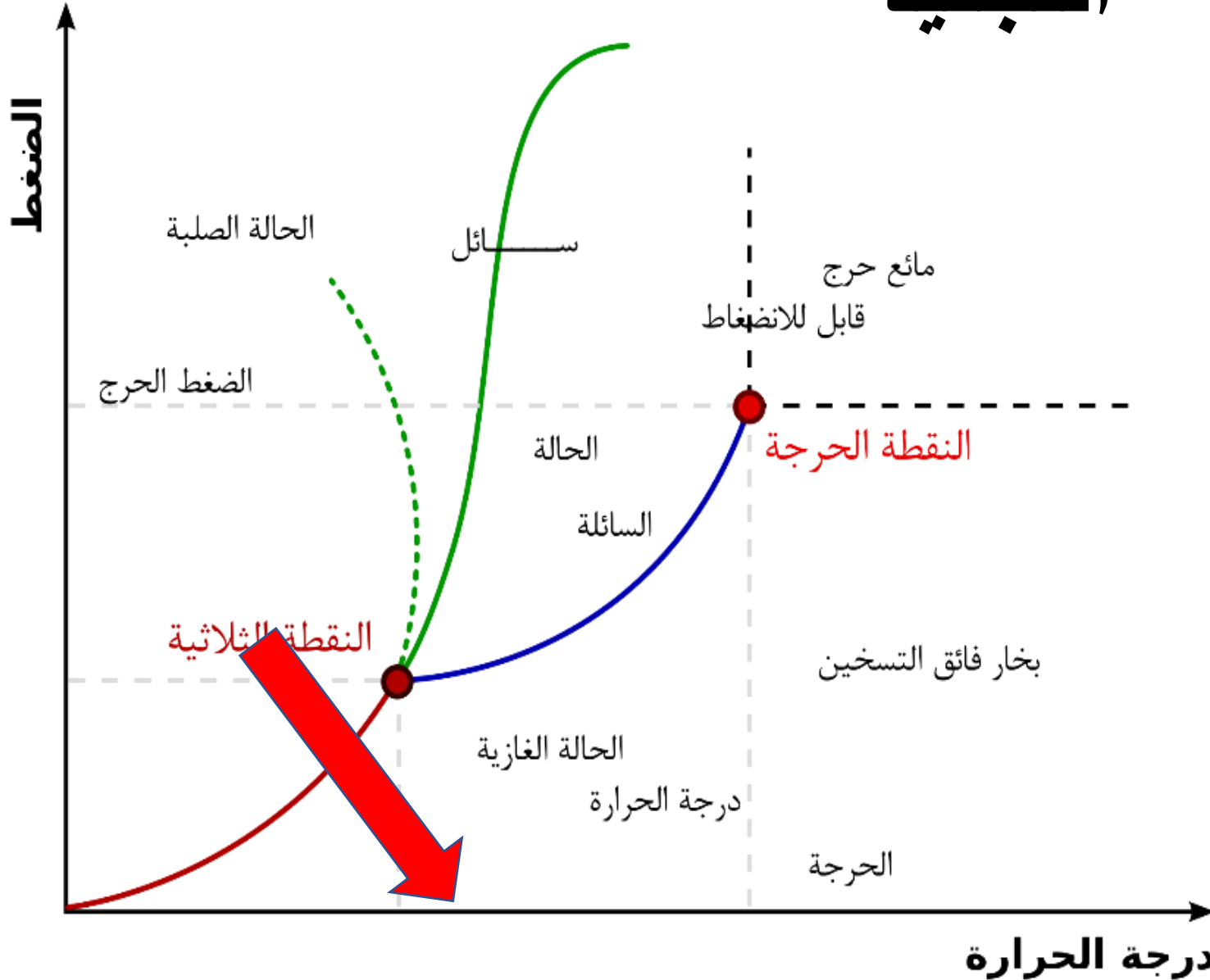
عملية التجفيد لا تتم فيها عملية حركة للرطوبة من الداخل الى السطح وبالتالي لا توجد هجرة للمكونات الداخلية

درجة الحرارة المنخفضة تسمح بالإحتفاظ بالنشاط البيولوجى للمادة المجففة.

درجة الحرارة المنخفضة تساعد أيضا على احتفاظ المنتج بمكونات الرائحة والنكهة المتطايرة

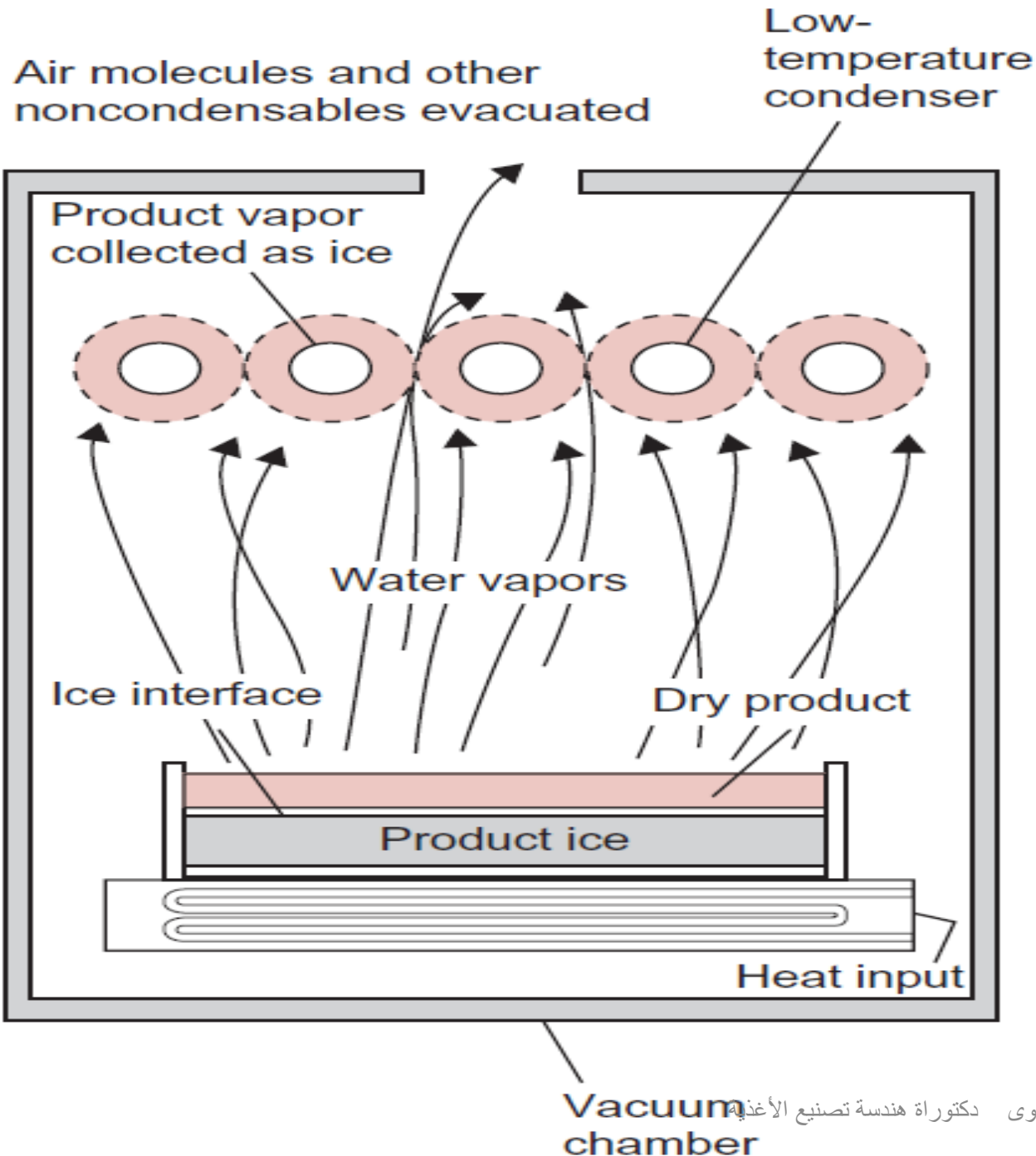
العيوب

التجفيد



في عملية التجفيد يتسامى الثلج متحولاً إلى بخار وعملية التسامي هذه تتطلب خفض الضغط إلى قيمة أقل من النقطة الثلاثية ثم إضافة حرارة تسامي أكبر من 2.8 MJ/kg لزيادة درجة الحرارة عند الضغط المنخفض وبذلك يحدث تغير في الطور من الحالة الصلبة إلى بخار مباشرة دون مرور بالطور السائل

نظام التجميد



$$t_{fd} = \frac{\rho (M_o - M_f) X^2}{2K_p (1 + M_o) (P_s - P_o)}$$

حيث :

M_o : المحتوى الرطوبي الابتدائي على أساس جاف

M_f : المحتوى الرطوبي النهائي على أساس جاف

P : كثافة المادة المجمدة.

LHV : الحرارة الكاملة للتبخير

X : سمك المادة إذا كان التجميد من جانب واحد

أو سمك المادة على ٢ إذا كان التجميد من اتجاهين.

K_T : معامل التوصيل الحرارى .

P_s : ضغط التسامي ، P_o : ضغط المكثف .

K_p : معامل له علاقة بنفاذية المادة الجافة

مسائل

مثال (١)

يراد تجفيف 720 kg /h من مكعبات البطاطس في نفق تجفيف ذو سريان متوازي من محتوى رطوبي 75% الى محتوى رطوبي 50% على أساس رطب توضع البطاطس في صواني أبعادها 1.4 m * 1.5 m بحمولة 2 kg/m² 10.5 وتوضع الصواني على شاحنات بحيث أن كل شاحنة تحوي 12 صينية ويتسع نفق التجفيف لشاحنتين فقط يستخدم للتجفيف هواء جوى درجة حرارته الجافة 27 °C ورطوبته النسبية 40% بعد تسخينه الى درجة حرارة جافة 90 °C. ويمر الهواء في المجفف بمعدل 550kg/min إذا كان معامل انتقال الكتلة K_m يساوى 244 kg/h.m² أحسب الزمن اللازم للتجفيف.

مسائل

مثال (٢)

مجفف مستمر من النوع المعكوس يستخدم في تجفيف منتج من محتوى رطوبي 0.2 كجم مادة جافة الى محتوى رطوبي 0.05 كجم ماء / كجم مادة جافة.

إذا كان معدل التجفيف يعادل 500 كجم مادة مجففة في الساعة. تدخل المادة المجفف بدرجة حرارة $^{\circ}\text{C}$ 20 وتخرج على درجة $^{\circ}\text{C}$ 70 الحرارة النوعية للمادة الجافة $^{\circ}\text{C}$ 2kJ / kg. يدخل هواء التجفيف المجفف على درجة حرارة $^{\circ}\text{C}$ 90 ورطوبة مطلقة 0.005 كجم ماء / كجم هواء جاف ويخرج الهواء الرطب من المجفف على درجة $^{\circ}\text{C}$ 40 بفرض ثبات الحرارة النوعية للمادة وعدم وجود أى فقد من المجفف أحسب معدل هواء التجفيف وكذلك رطوبة الهواء المطلقة عند المخرج.

مسائل

مثال (٣)

هواء درجة حرارته الجافة 25°C ورطوبته النسبية 60% يسخن الى 100°C ويستخدم في تجفيف منتج يحتوي على 25% مواد صلبة وكان قطر قطرات المنتج الخارجة من الرشاش حوالى 65 ميكرون ومحتواها الرطوبي الحرج 48% على أساس رطب ويخرج المنتج من المجفف فى حالة توازن مع الهواء وعلى درجة حرارة 50°C ورطوبة نهائية 5% على أساس رطب. على فرض أن الحرارة الكامنة للتبخر $2360\text{kJ} / \text{kg}$ - صمم المجفف اللازم (قدر أبعاد المجفف) إذا كان معدل التغذية $20\text{ kg}/\text{min}$ عند درجة حرارة 15°C افرض أن

$$\rho_L = 1100\text{ kg} / \text{m}^3 \quad \rho_P = 1450\text{ kg} / \text{m}^3 \quad K_m = 0.0307\text{ W}/\text{m}.\text{C}$$

مسائل

مثال (٤)

إحسب الزمن اللازم لتجفيف لبن منزوع الدسم في مرحلة التجفيف الثابت والمتناقص إذا كان قطر الرذاذ 20 ميكرون. يستخدم هواء درجة حرارته الجافة 115°C ورطوبة نسبية 2% وإذا أصبح قطر قطرة الرذاذ في نهاية فترة المعدل الثابت 10 ميكرون. والحرارة الكامنة لتبخير 2177 kJ/kg إذا فرض أن $\rho_L = 1035\text{ kg/m}^3$ وأن المحتوى الرطوبي النهائي على أساس رطب 5%

مسائل

مثال (٥)

إحسب الزمن اللازم لتجفيد شريحة من اللحم سمكها 25mm وكثافتها الابتدائية 1070kg/m^3 ومحتواها الرطوبي الابتدائي 75% (على أساس رطب) والمحتوى الرطوبي بعد التجفيف 4% (على أساس رطب) يجب المحافظة على ضغط التسامي عند 250 ميكرون زئبق وضغط المكثف عند 100 ميكرون زئبق . أفرض أن قيمة الثابت K_p هي $2.3 * 10^{-9} \text{ kg/m} \cdot \mu$ أحسب كذلك الزمن اللازم لتجفيد شريحة سمكها 15mm.