الوحدة الثانية عشرة

التجفيف DRYING

التجفيف عملية أساسية من العمليات الصناعية سواء" أكانت الصناعة تحويلية كما هي الحال في صناعة الاشكال الصيدلانية أم في الصناعات الكيميائيـة • ففي تصنيع كيميائيات الدواء تأتي عملية التجفيف كمرحلة نهائية في التحضـير ، حيث يسهل تداول المواد الجافة وحفظها وادخالها في الاشكال الدوائية اللاحقة •

وفي صنع المضغوطـات يشكل التجفيف احـدى الخطوات الهامة في هـذا التصنيع • فالتحثير يتم باستعمال محلول لمادة رابطة بغية الحصول على الحثيرات ، وهي الشكل القابل للضغط • والحثيرات الرطبة الناتجـة تجفف قبل مزجها مـع المكونات الاخرى لتحويلها الى المضغوطات •

وتستعمل أفران التجفيف المخبريـة في تجفيف المساحيق قبل مزجهـا ، وفي التخلص من الماء البلوري ، وفي عمليات مخبرية كثيرة •

ويعتبر التجفيف مرحلة هامة بعد عمليـة التبلور ، وذلك للتخلص من المـاء المحمول عـلى البلورات ، حيث يؤدي وجود الرطوبة الى التصاق البلورات وقـد يسبب فساد المادة الكيميائية •

والكثير من الموا دالغذائية المحفوظة تجفف قبل حفظها وذلك بغرض زيـادة ثباتها • فالعقاقير النباتية تجفف قبل حفظها ، كما أنها تجفف قبل طحنها وتهيئتهـا للاستخلاص حيث يصبح الطحن أكثر سهولة مع جفاف هذه المواد •

وتفيد عملية التجفيف أحيانا في الحصول على شكل جديد بتحضير المادة كما

هي الحـال في تجفيف ماءات الالمنيوم ، واللاكتـوز المجفف بالتثليج ، وتحضير الخلاصات الجافة •

ويفيد التجفيف في خفض تكاليف المواصلات والخزن ، وبالتجفيف كما أسلفنا نقلل أو نمنع التكاثر الجرثومي •

كما يساعد التجفيف في استبعاد الماء الذي يمكن أن يحلمـه أو يخرب بعض المواد مثل المركبات الفوارة والاسبيرين والبنسللين وغيرها •

فالغرض من التجفيف هو التخلص من الماء بشكل عـام أو المذيبات الاخرى التي يمكن أن تتخلف عن بعض العمليات • ويفرق في هذا عن التبخير Evaporation بأن الاخير يختص بالتخلص من كمية كبيرة من الماء في المنتج ، بينمـا في التجفيف لا نصل الى نفس هـذه الكمية • وفي التجفيف غالبا ما تكون المـادة الخام التي تتناولها أجهزة التجفيف هي المادة الصلبة الحاوية على الماء ، بينما في حالات أخرى فان عملية التجفيف تجري بدءاً مـن المحاليل والمعلقـات ، كما هي الحال عنـدما يستعمل المجفف الطبلي Drum Dryer وجهاز التجفيف الارذاذي Spray Dryer

وعملية التجفيف تبغي التخلص من الماء ، عـن طريق تبخيره في درجـات من الحرارة أقل من درجة الحرارة التي يغلي عندها الماء ، بينما في حالة التبخير يجري التخلص من الماء برفع درجة الحرارة الى الغليان • وغالبا ما يستعمل في التجفيف الهواء أو أية غازات أخرى غيره ، وذلك لنزع الماء من المادة المراد تجفيفها ، بينمـا تتم عملية التبخير دون استعمال هـذه الغازات • وبشكل عـام فان التفريق بين التجفيف والتبخير يتم عن طريق التدقيق في المنتج النهائي ، فاذا كان هـذا المنتج جافا وخاليا من الماء نسبيا فان العملية المطبقة هي التجفيف ، بينما اذا احتوى المنتج كمية كبيرة نسبيا ، وكان بشكل سائل فان العملية المطبقة هي التبخير •

المجففات وطرق التجفيف الرئيسية Dryers and Main Driying Methods :

التجفيف يمكن أن يتم بطرق مختلفة ، والطريقة التي سنفصلها هي الطريقـة

الحرارية العادية في التجفيف والتي تترك فيها الرطوبة الجسم من سطحه • وهنالك بعض الطرق الاخرى في التجفيف •

١ ــ استعمال المواد المجففة Dessicants :

وهي طريقة غير حرارية وتأتي في كثير من الاحيان مكملةً للتجفيف العادي • فكلور الكالسيوم مثلا شديد الولع بالماء ، لذا فان وضعه في حيز مع مادة تحتوي على الرطوبة سيؤدي الى امتصاصه للرطوبة وبالتالي تجفيف المادة المطلوبة • وفي تجفيف الغازات من الرطوبة فان امرارها على حمض الكبريت يفضي الى تخليصها من الغازات المتكاثفة (الماء) •

٢ ــ التسخين بامرار التيار الكهربائي Dielectric Heating :

حيث تتولد الحرارة نتيجة امرار الجسم في حقل كهربائي ذي تواتر عالٍ • تستعمل هذه الطريقة لبعض الحالات الخاصة في الاصطناع العضوي نظرا لتجانس الحرارة مع التسخين •

٣ ــ التسخين بالاشعة تحت الحمراء Infra - red Heating :

وهي تشبه الطرق العادية في التجفيف وتختلف عنها باستعمال مصابيع الاشعة تحت الحمراء بدلا من المنابع الحرورية العادية •

وهنالك طرق أخرى كالعصر وغيرها •

ويمكن أن نصنف أجهزة التجفيف تبعاً لحجم العملية الى التجفيف على النطاق الضيق والتجفيف الصناعي •

هذا ويتم التجفيف غالبا على مختلف المستويات بواسطة الحرارة حيث تعتمد هذه الاجهزة على مبدأ نزع الهواء للرطوبة من المواد المراد تجفيفها • تصنف

المجففات الحرارية حسب الحالة الفيزيائية للمواد المجففة وحسب حركية هذه المواد الى ما يلي :

١ ـ الاجهزة التي تتداول الاجزاء الصلبة ونصف الصلبة بشكل حبيبي

آ ـ المواد المجففة ثابتة غير متحركة Static Bed Systems • نعني بالحركة في هذا الصنف الحركة النسبية للمواد بالنسبة لبعضها ، وعلى هذا فان المجففات التي تكون فيها المواد على عربات وتتحرك هذه العربات تدخل ضمن هذا الصنف • وفي هذا النوع لا تتعرض المادة جميعها للهواء المجفف بشكلٍ مباشر •

١ ـ أفران التجفيف ذات الرفوف Tray Dryers

١ ـ أفران التجفيف ذات الرفوف الهوائية Atmosphere Tray Dryers

٢ ـ أفران تحت ضغط منخفض Vacum Tray Dryers

٢ ـ أفران التجفيف ذات العربات Truck Dryers

١ ـ المجففات ذات العربات الهوائية Atmosphere Truck Dryers

٢ ـ المجففات ذات العربات تحت ضغط منخفض Vacum Truck Dryers

٣ ـ المجففات النفقية Tunnel Dryers

٤ ـ المجففات ذات السير Conveyor Dryers

ب ـ المواد المجففة متحركة Moving Bed Systems

١ ـ المجففات العنفية Turbo - Tray Dryers

٢ ـ مجففات الجملة المعلقة Fluidized - Bed Systems

٣ ـ المجففات الدوارة Rotary Dryers

٤ ـ المراشح والمجففات بآن واحد Filter - Dryer Combinations

٢ ـ المجففات التي تتداول المواد الصلبة بشكل صفائح Sheets Cylinder Dryers

٣ ـ الاجهزة التي تتناول المعاجين والكتل السميكة Pastes and Sludges

آ ـ المجففات المحركة Agitated Dryers

ب ـ المجففات ذات القدر Pan Dryers

٤ ـ الاجهزة التي تتناول المحاليل والمعلقات Materials In Liquids

آ ـ المجففات الطبلية Drum Dryers

١ المجففات الطبلية الهوائية Atmosphere Drum Dryers

٢ ـ المجففات الطبلية تحت الضغط المنخفض Vacum Drum Dryers

ب ـ المجففات الارذاذية Spray Dryers

جـ ـ المجففات الفجائية Flash Dryers

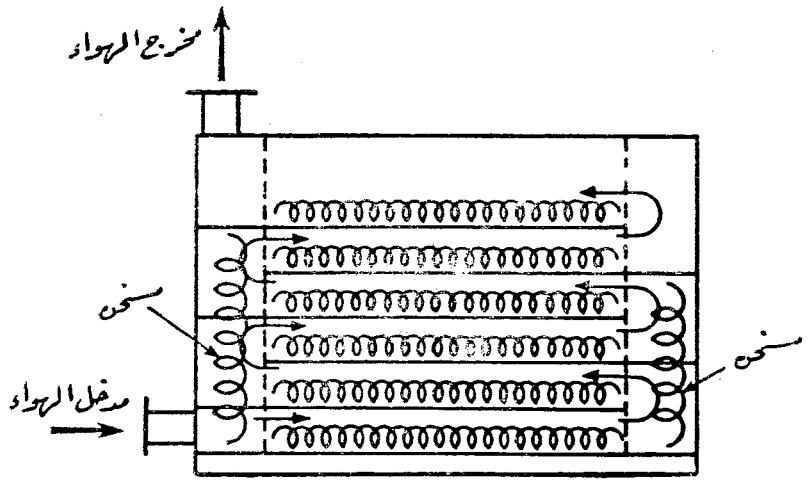
د ـ المجففات بالتثليج Freeze Dryers

أفران التجفيف ذات الرفوف Tray Dryers :

وهي المجففات الشائعة في الصناعة الصيدلانية وفي المخابر المختلفة • يتألف الجهاز من حيز ذي جدران سميكة تحتوي على مادة عازلة للحرارة مثل الاسبستوس (Asbestos) وذلك للاقلال من فقدان الحرارة ما أمكن • وتحتوي هذه الافران على رفوف مثبتة في داخلها ، وأكثر المجففات الحديثة من هذا النوع تحتوي على جهاز لتثبيت درجة الحرارة داخل المجفف (مثبت للحرارة Thermostat) وعلى مراوح تختلف سرعتها حسب الحاجة ، وذلك لخلق تيار من الهواء داخل الجهاز • وتقسم هذه المجففات الى قسمين وذلك حسب الضغط الذي تجري تحته عملية التجفيف •

أفران التجفيف الهوائية Atmosphere Tray Dryer :

وهي المجففات التي تعمل تحت ضغط الهواء الجوي، دون الاستعانة بالمضخات التي تخلق الفراغ • وعادة تحتوي هذه الاجهزة على مراوح تحرك الهواء في داخلها • فالهواء الداخل يمر على مقاومات ترفع درجة حرارته ، وتزيد من قدرته على حمل الرطوبة ، ثم يمر الهواء بعد تسخينه على الرفوف التي تكون إما مثقبة أو كتيمة • وعند مرور الهواء على الرفوف تتبادل المادة محتواها من الرطوبة مع الهواء المسخن المار عليها • وحسب الشكل المرفق (١ ـ ١٢) يدخل الهواء من



(شكل ١ ــ ١٢) مجفف ذو رفوف مجهز بمروحة ومقاومات جانبية

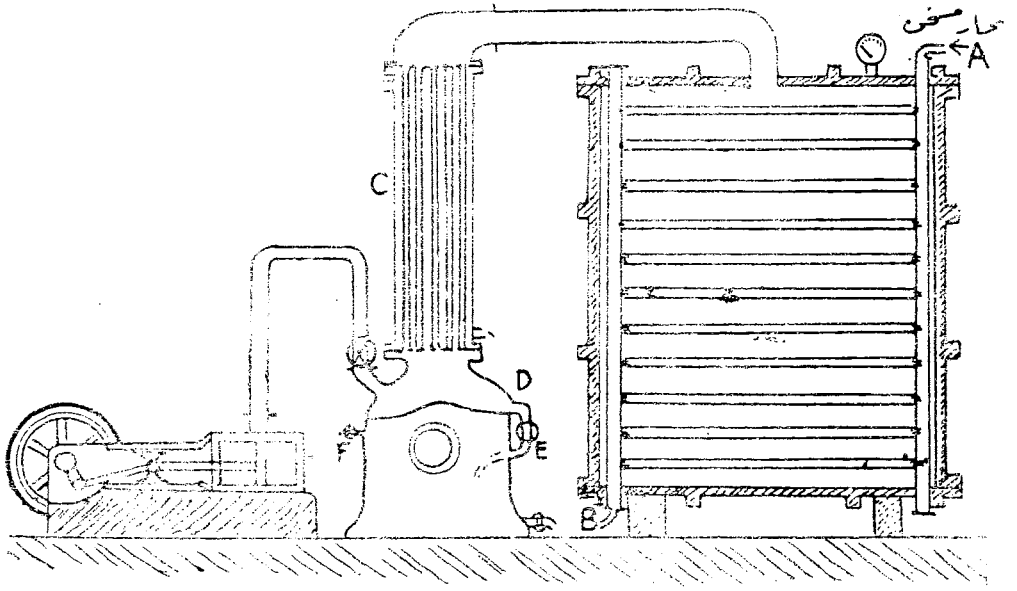
مدخل جانبي بتأثير مروحة موضوعة في المدخل ، حيث يمر هذا الهواء على المقاومة الكهربائيـة الموجودة في جانب الجهاز • ويتابع الهواء سيره بعد تسخينه فيمر على الرف الاول ، ثم ينفذ الى الجانب المقابل ، ليمر عـلى المقاومة الكهربائية في هـذا الجانب ، ويدخـل عبر الجـدار المثقب الى الرف الثاني ، حيث يمر على المـواد الموضوعة على هذا الرف • وهكذا يتابع الهـواء تسخينه ومروره على كل رفٍ ، حتى يخرج من فتحـة في أعلى الجهاز • ومن مميزات مرور الهـواء المتعدد ، بدلاً من أن يرسل هذا التيار من الهواء على المواد مرة واحدة ، أن الهواء في هذه الحالة يحمل كمية أكبر مـن الرطوبة ، كمـا أن درجة حرارته تكون نسبيا ضئيلة فيمـا اذا قورنت بدرجة الحرارة المطلوبة للحصول على نفس معدل التجفيف عن طريـق امرار الهواء مرة واحدة على المواد •

مجففات ذات الرفوف تحت ضغط منخفض = مجففات ذات الرفوف المخلاة

Vacum Tray Dryers

يتألف هذا النـوع من الافران من رفوف ، تسخن عن طريق تيار من بخـار المـاء الساخن يمرر في داخلها ، أو بأيـة واسطة أخرى • يتصـل المجفف بمضخة

تفرغ الهواء من داخل حيز الفرن • ففي حالة الافران المسخنة بتيار من البخار الحار فان درجة حرارة الرفوف تتراوح بين ١٠٠ الى ١١٠° تقريبا • توضع المادة الرطبة المراد تجفيفها على الرفوف ، ثم يشغل الجهاز • هذا وتكون درجة حرارة المادة منخفضة طالما أن المادة تحتوي على كمية لا بأس بها من الرطوبة ، حيث تعادل الحرارة التي تعطيها الرفوف المسخنة لحرارة التبخر • اما اذا انخفض محتوى الرطوبة في المادة ، فان كمية الحرارة التي تأخذها المادة من الرفوف تكون أكبر من حرارة تبخر الماء ، ولهذا فان درجة حرارة المادة ترتفع ، حيث يمكن أن تصل الى درجة حرارة الرفوف التي تحتويها ، وفي هذا خطر كبير على المواد الحساسة من الحرارة • ففي حالة هذه المواد تتخذ احتياطات لتلافي ذلك • فاذا كانت الرفوف تسخن بتيار من الماء يمر داخلها فان درجة حرارة الماء يمكن أن ترفع أو تخفض حسب المادة المدخلة الى الفرن • ويجب الانتباه في هذه الحالة الى أن تكون درجة الحرارة متساوية على جميع الرفوف ، وذلك بضمان جريان الماء بصورة منتظمة على كل هذه الرفوف ، حتى تعطينا منتجا متجانسا في احتوائه للرطوبة •



(شكل ٢ ــ ١٢) مجفف ذو رفوف تحت الضغط المنخفض

وينبغي الانتباه الى أن الحرارة في الافران تحت الضغط المنخفض تنتقل بواسطة التوصيل Conduction ، بين المادة والرف الحامل لها ، اذ أن انتقال الحرارة بواسطة الحمل يكون معدوما ، نظرا لانخفاض الضغط داخل الجهاز وقلة الهواء في الحيز • كما أن انتقال الحرارة بواسطة الأشعاع يكون ضئيلا ، نظرا لعدم ارتفاع درجة الحرارة الى مستوياتٍ كبيرة • ولهذا فمن الضروري في هذا النوع أن يسخن كل رف على حدة حتى نضمن انتقال الحرارة بطريق التوصيل بالكميات المطلوبة لاتمام عملية التجفيف •

تستعمل أفران التجفيف تحت الضغط المنخفض للمواد الحساسة للحرارة ، كما تستعمل في حالة المواد التي تتأثر بوجود أوكسجين الهواء (فيتامينات وغيرها)• وبالاضافة الى ذلك تتمتع هذه الاجهزة بميزات أخرى تتمثل في سهولة جمع ما تحتويه المواد المجففة من سوائل طيارة في المكثف المستعمل فيها ، حيث نستطيع أن نستفيد من هذه المذيبات عندما تكون من النوع الثمين • تستعمل أجهزة التجفيف تحت الضغط المنخفض للمواد الثمينة والحساسة ، وذلك لان تكاليف استخدامها تكون أكبر من الافران الهوائية العادية ، نظرا للتفريغ الهوائي فيها ، ولطريقة التسخين المعقدة التي تطبق لها • وأهم عيوب هذه الاجهزة هي :

١ ــ تتطلب وجود مضخة ، كما تحتاج الى مكثف بين الفرن والمضخة ، مما يحمل الصانع مصروفات اضافية ، علاوة على أن ثمنها الاصلي يكون أعظم من الافران العادية ، كما أن جدران هذه الاجهزة أكثر منانةً لتحملها فروق الضغط الناجم عن الفراغ في داخلها •

٢ ــ تنجرف بعض الاجزاء الناجمة عن التجفيف وذلك بتأثير قوة سحب المضخة ، وما يترتب عن هذا من خطر تخرب المضخة ، وخسارة المسحوق الناعم • لذا يجب أن توضع مرشحة للهواء بين المجفف وبين المضخة •

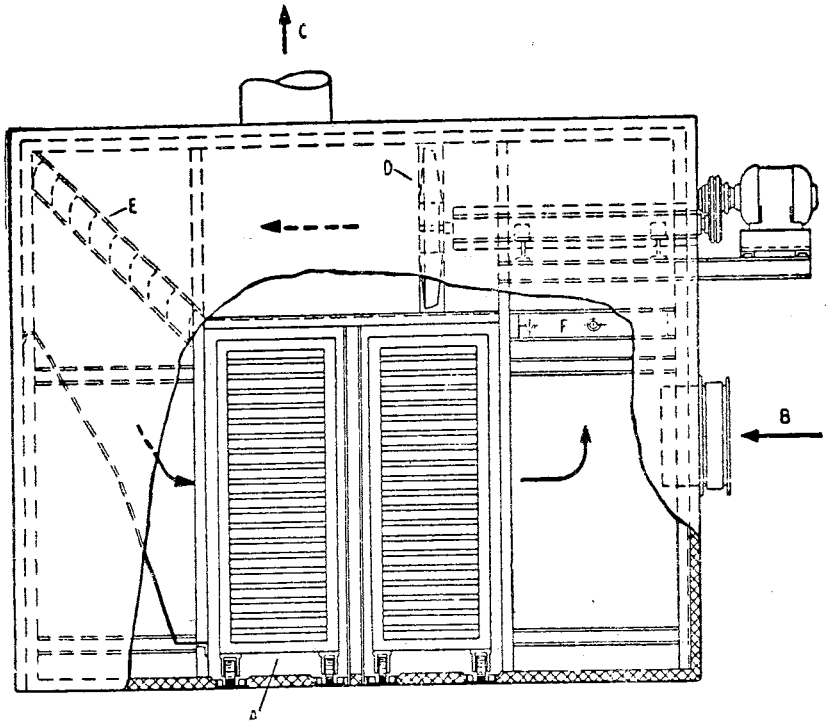
٣ ــ يجب طحن المواد قبل تجفيفها ، وذلك حتى نضمن التخلص التام من الرطوبة •

٤ ــ بعض المواد تزبد عندما تسخن تحت الضغط المنخفض ، مما يؤدي الى خطر انسكاب المادة في داخل الفرن .

أفران التجفيف ذات العربات Truck Dryers :

يمكن اعتبار هذه المجففات تنوعا من الافران ذات الرفوف . تتميز هذه المجففات بأن رفوفها غير مثبتة في اطار الجهاز بل تشكل هذه الرفوف وحدة مجهزة بعجلات تجعل من اليسير ادخال واخراج العربات من والى الفرن ، وتكون أحجام هذه الافران كبيرة تتلاءم مع حجم المواد المراد تجفيفها في الصناعة الدوائية .

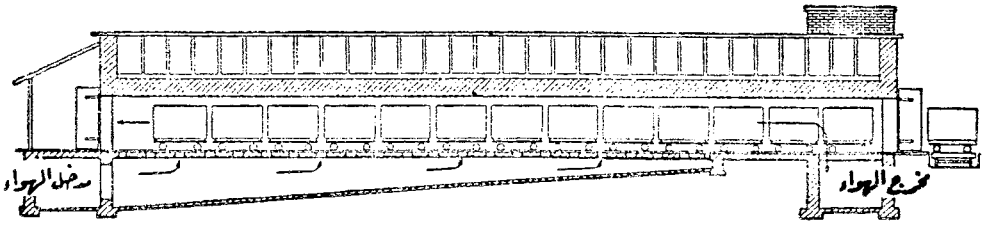
وكما هي الحال في الافران ذات الرفوف فان لمجففات العربات تنوعين حسب الضغط المطبق .



(شكل ٣ ــ ١٢) مجفف ذو عربات

المجففات النفقية Tunnel Dryers :

وهي أجهزة تشابه في عملها الافران ذات العربات ، سوى أنها تعمل بطريقة مستمرة غير متقطعة (Continuous Way) .

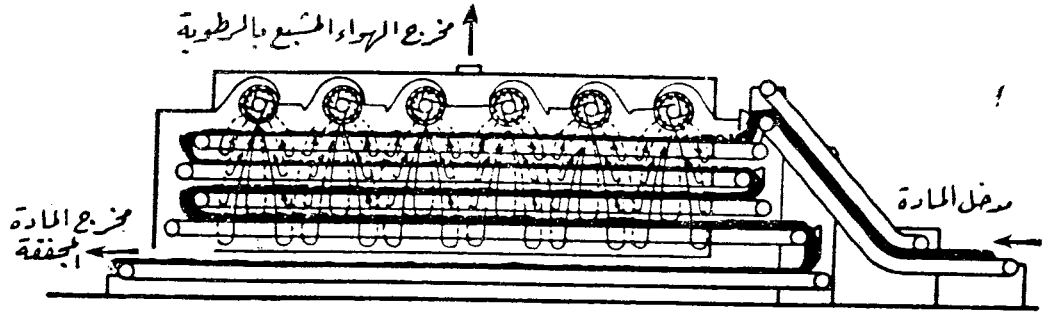


(شكل ٤ ــ ١٢) مجفف نفقي ذو عربات

يحتوي المجفف الافقي على ممر أفقي بشكل متطاولٍ ذي قاعدة مثقبة • توضع المادة المراد تجفيفها على عربات صغيرة تتحرك داخل هذا النفق • فعند دخول عربة جديدة الى النفق ، تخرج من الطرف البعيد عربة أخرى قد جفت محتوياتها • يتم التجفيف عن طريق تيار من الهواء يدخل في ثقوب قاعدة النفق • وهنالك وسيلة مناسبة لتسخين هذا الهواء ، وزيادة قدرته على التجفيف •

المجففات ذات السير Conveyor Dryers :

يبين الشكل (٥ ــ ١٢) نمطاً من هذه المجففات • يتألف الجهاز من سير جلدي يمر بشكل متعاكس عددا من المرات حاملا معه المواد المراد تجفيفها •



(شكل ٥ ــ ١٢) مجفف بسير جلدي

يدخل الهواء بواسطة عدد من المراوح التي تمرر تيار الهواء عبر الممرات داخل الجهاز .

الاجهزة التي تتداول مواد متحركة Moving Bed System :

تتميز هذه الاجهزة بأن المواد المجففة تكون في حركة جزئية نسبية عن بعضها والتحريك يمكن أن يتم اما بواسطة الثقالة الارضية أو بواسطة آلية . ومن البديهي أن كفاءة التجفيف تكون أعظم مع تطبيق الحركة في هذا النوع .

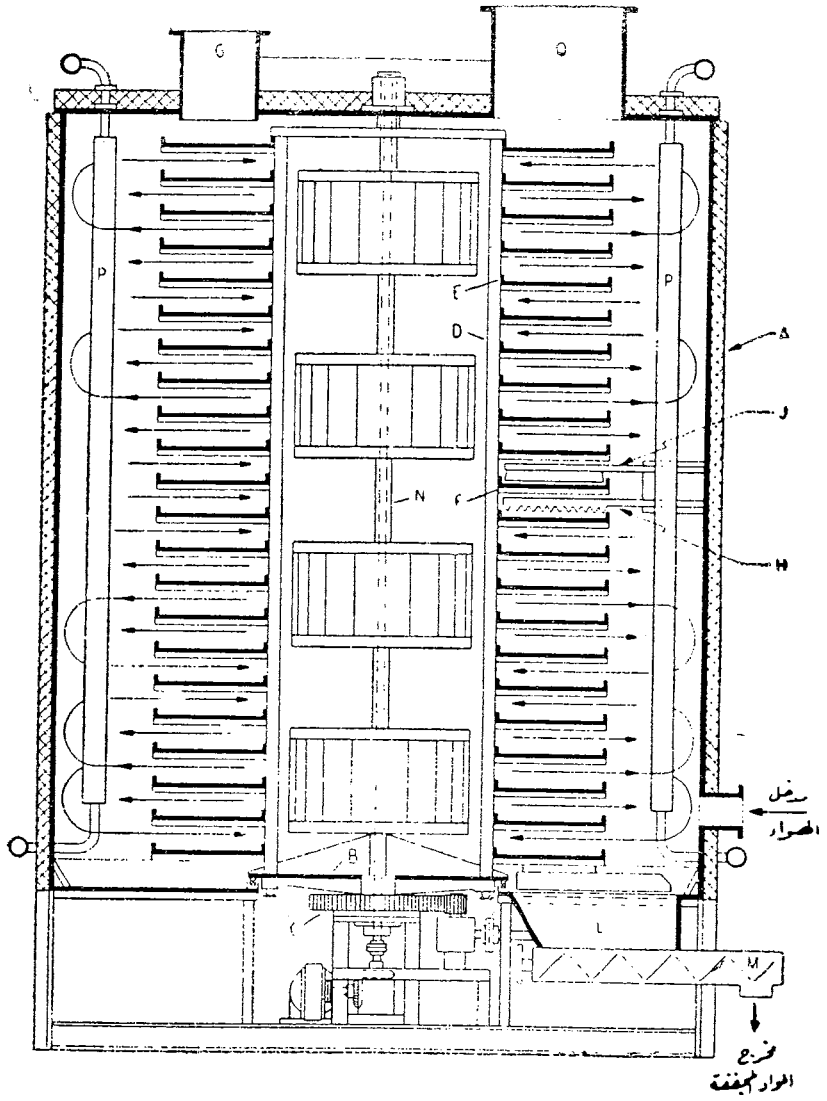
المجففات العنفية Turbo - Tray Dryers :

تحتوي هذه المجففات عددا من الرفوف الحلقية التي تحتوي في وسطها على وسيلة دفع الهواء وهي العنفات ومنها أتى اسم الجهاز . تدفع المواد من الرف الاعلى حيث تسقط الى الرف الادنى ، وهكذا حتى تخرج من أسفل الجهاز. يمتاز الجهاز بكونه مستمر العمل حيث تدخل المواد من الاعلى ونحصل على المنتج في أسفل الجهاز بصورة مستمرة . شكل (٦ ــ ١٢)

مجففات الجملة المعلقة Fluidized - Bed Systems :

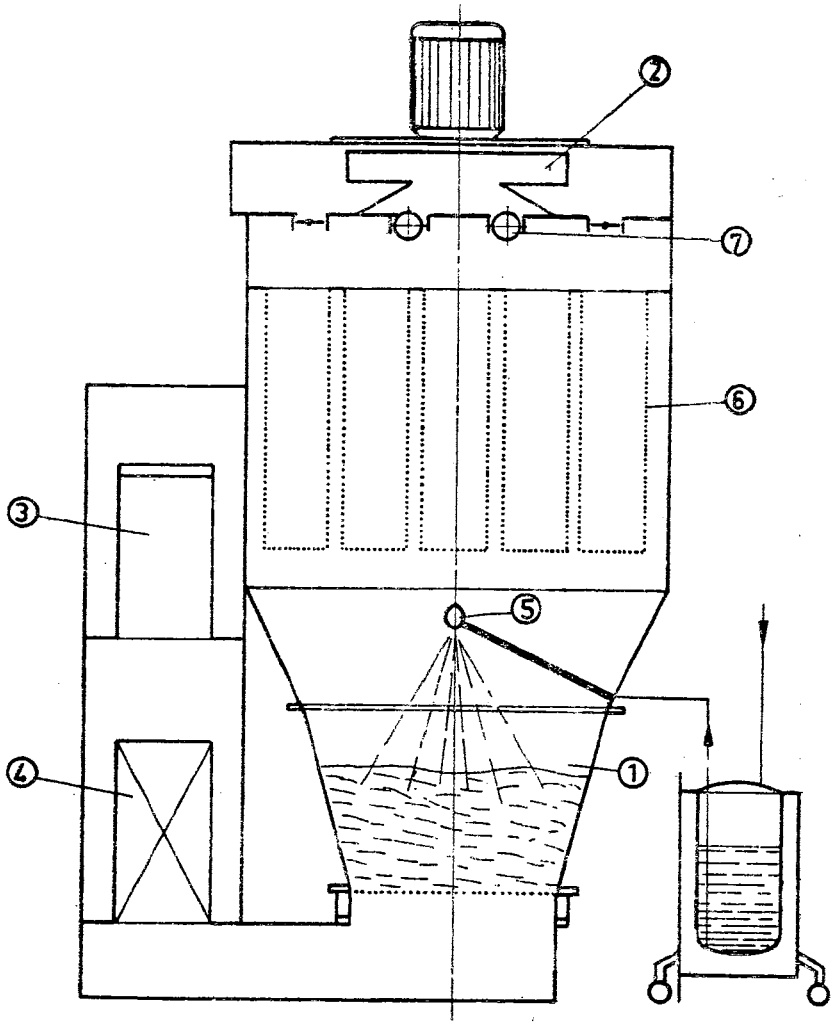
اذا أرسل تيار من غاز أسفل كتلة من المواد الصلبة الحبيبية بسرعة هي أكبر من سرعة ترسب أجزاء المادة الصلبة ، ولكن هذه السرعة لا تصل الى الحد الذي تجرف معه المادة الصلبة فان هذه المواد ستعلق جزئيا في التيار الغازي ، فبتأثير الدفع فان المواد الصلبة سترتفع قليلا لتعود الى قاعدتها . ومزيج المادة الصلبة والغاز يكون على درجة كبيرة من المرونة بحيث تتخذ شكل الحيز الذي تعلق فيه معطيةً زاويةً للانسياب Angle of Repose تساوي الصفر (المزيج يكون كالمائع تماما في السلوك) .

تلائم هذه الطريقة من التجفيف المواد ذات التركيب الحبيبي كالحشيرات



(شكل ٦ ــ ١٢) مجفف عنفي Turbo - Dryer

والحبيبات حيث تكون الحثيرات محاطة بالغاز المجفف مع تجفيف متجانس لكافة أجزاء المواد المعاملة • لهذه الطريقة مزايا كثيرة على طرق التجفيف العادية للحثيرات فهي أسرع بحيث يتم التجفيف خلال وقت هو أدنى من وقت التجفيف العادي بالاضافة الى مزايا التجانس في التجفيف وسهولة الاستخدام والتداول • ومن الشروط التي يجب أن تحققها الحثيرات المعاملة ألا تكون شديدة الرطوبة حتى لا تتلاصق ، وأن تحقق الحثيرات قساوة معينة حتى لا تتفتت وتزداد نسبة المواد الناعمة في الكتلة المجففة • شكل (٧ ــ ١٢)



(شكل ٧ ــ ١٢) مجفف للجملة المعلقة

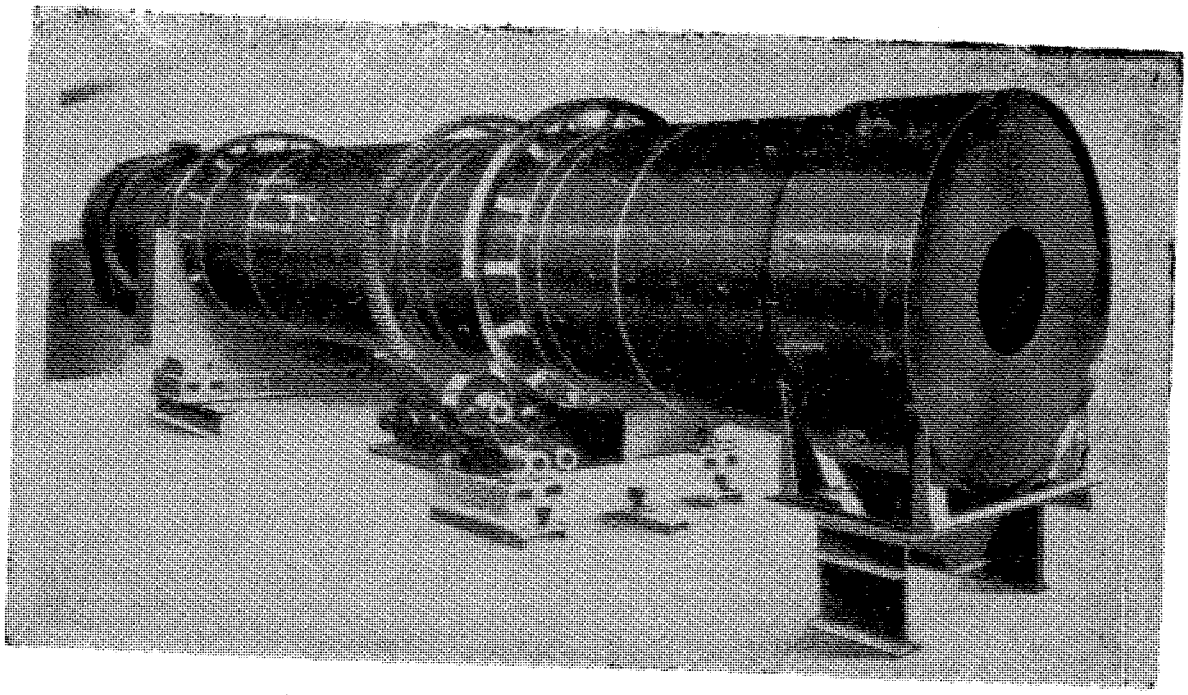
المجففات الدوارة Rotary Dryers :

وهي أجهزة مصنوعة أساسا لتجفيف كميات ضخمة من المواد ، وذلك في الوحدات الكبيرة من المصانع ، بحيث تعطينا انتاجا يبلغ عدة أطنان في الساعة • وحاليا فان أجهزة صغيرة نسبيا من هذا النوع تتوفر في الوحدات الصغيرة من المعامل ، وخصوصا في حالة تجفيف المواد المعقمة • يتركب الجهاز من أسطوانة أفقية مائلة قليلا على زاوية الافق ، وذلك حتى تضمن جريان المادة من الطرف الاعلى الى الطرف الاسفل من الاسطوانة عند تشغيلها • ووسيلة التسخين في هذه المجففات تعطي تيارا من الهواء الساخن أو أي غاز حار آخر يناسب عملية التجفيف • هذا التيار من الغاز إما أن يرسل من أسفل الاسطوانة ، حيث يتخلل المادة المجففة ، أو أن يرسل بشكل يساير حركة المادة المجففة ، أو بشكل تيار معاكس • ومن وسائل التسخين الاخرى أن تسخن الاسطوانة نفسها وذلك

بغلاف يجري فيه الهواء المسخن أو بخار الماء الحار • يشغل الجهاز بعد ادخال المادة المراد تجفيفها اذا كان من النمط المتقطع Batch Wise ، أو أن المادة تدخل بصورة مستمرة Continuous من طرف الجهاز لتخرج من الطرف الآخر • يتم التجفيف عندما تدور الاسطوانة وتتحرك المادة المجففة باتجاه ميل هذه الاسطوانة ، حيث ترتفع في داخل الاسطوانة بواسطة ألواح معترضة ثم ترشق على السطح الاسفل للاسطوانة ليتخللها الهواء أثناء دوران الجهاز •

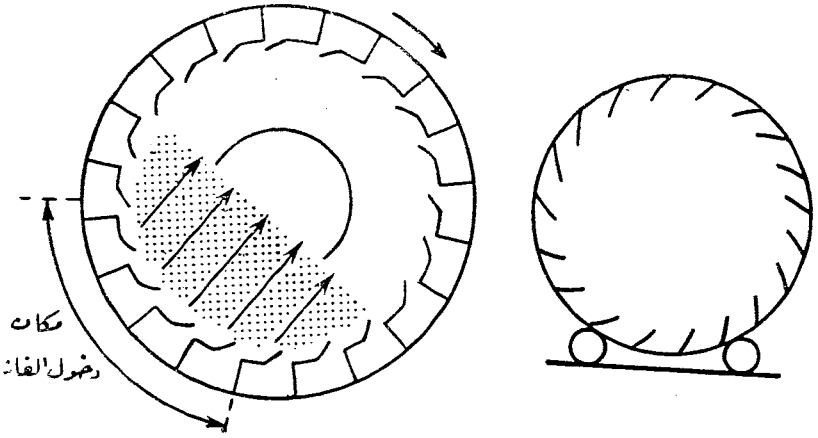
وفي حالة المواد التي تحتوي على سوائل ثمينة ، يراد الحصول عليها ، فان المجفف الدوار المستعمل يكون مجهزا بمخلية الهواء • تتصف الاسطوانة في هذه التنوعات بالثبات ، حيث تسخن بواسطة غلاف يمرر فيه تيار من البخار الحار • تتم حركة المواد المجففة عن طريق مازج ذي شكل حلزوني ، يؤدي نفس الغرض الذي تؤديه كل من دوران الاسطوانة والالواح المعترضة في تقليب المادة ، كما أن المازج ينقل المواد المجففة من طرف الجهاز الى طرفه المقابل •

تستعمل أجهزة صغيرة نسبيا من هذا النوع في صناعة المضادات الحيوية



(شكل ٨ ــ ١٢) مجفف دوار Rotary Dryer

للحصول على المـذيبات المستعملة في استخلاص وتنقيـة هذه المركبات • تعمـل هذه الاجهزة في شروط عقيمة ، كما أن أجزاؤها كلها تكون مصنوعة مـن الصلب غير القابل للصدأ • وتعقم أجزاء المجفف قبل الاستعمال •



(شكل ٩ ــ ١٢) مقاطع في المجففات الدوارة

المراشح والمجففات بآن واحد : Filter - Dryer Combinations

يمكن أن يصنف هذا الجهاز كمرشحة طبليـة ذات تغذية رأسيـة Top Feed أو كمجفف للمواد الحبيبية ، فبعد عملية الترشيح التي تتم في أعلى الجهاز ينفـخ تيار الهواء الحار ليتخلل الكتلة الحبيبية ويقوم بتجفيفها • (انظر بحث الترشيح)

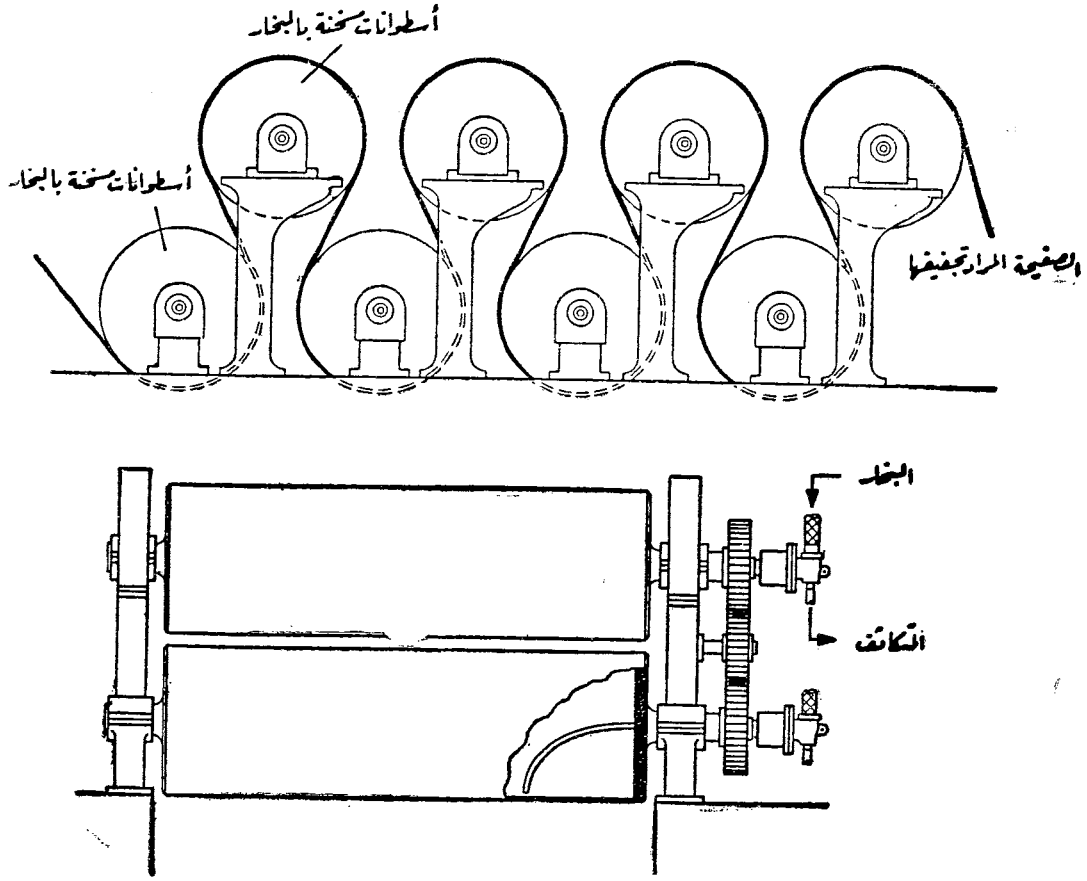
المجففات التي تتداول المواد الصلبة بشكل صفائح : Sheets

تحتاج المجففات التي تتعامل مع الصفائح الى تركيب خاص حيث يكون لهـا التركيب البسيط بحيث تسحب الصفائح لتمر على المنبع الحروري أو أن تصـادف تيار الهُواء الحـار في داخل الجهـاز أو أن تستخـدم المجففات الاسطوانيـة في عمليـة التجفيف •

المجففات الاسطوانية : Cylinder Dryers

تتألف هذه الاجهزة من عدد من الاسطوانات المسخنـة داخلا بالبخار الحار •

تلتف الصفائح حول الاسطوانات وتسحب من طرف لآخر بفعل دوران الاسطوانات حيث تصل الى الاسطوانة الاخيرة وقد تم تجفيفها بفعل حرارة الاسطوانات والعمل العاصر بين كل اسطوانتين متقابلتين • تستعمل هذه المجففات في صناعة الورق والنسيج وغيرها • شكل (١٠ ــ ١٢)



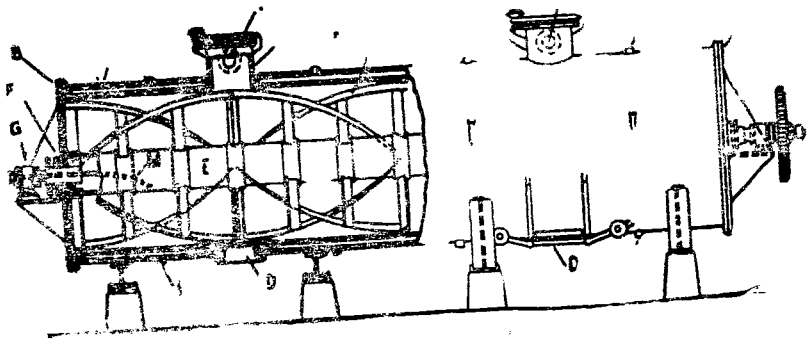
(شكل ١٠ ــ ١٢) مجموعة مجففات اسطوانية Cylinder Dryer

الأجهزة التي تتناول المعاجين والكتل السميكة Pastes and Sludges :

نظرا لمقاومة الكتل اللزجة للحركة ولانتقال الحرارة وبسبب قابليتها للالتصاق فان مجففات خاصة بها تمنع التصاقها بالجدران يمكن أن تستعمل • فالتحريك في مثل هذه الاجهزة لا غنى عنه حتى لا تلتصق الكتل وترتفع حرارة سطحها بفعل الانتقال الحراري •

المجففات المحركة Agitated Dryers :

يتألف الجهاز من أسطوانة أفقية مغلفة بغلاف يجري فيه البخار الحار • يحتوي الجهاز على محور عليه قضبان حلزونية تساعد في تقليب الكتل وتحريكها من طرف الجهاز الى الطرف الآخر • يدخل الهواء من طرف الجهاز لينتقل الى الطرف الآخر ، فهو يعمل بالهواء ، وبهذا يميز عن المجفف ذي القدر الذي غالبا ما يكون تحت الضغط المنخفض (شكل ١١ ــ ١٢) كما أن المجفف المحرك يمكن أن يكون متقطع العمل أو مستمر العمل ، بينما يتحدد عمل المجفف ذي القدر بالعمل المتقطع •



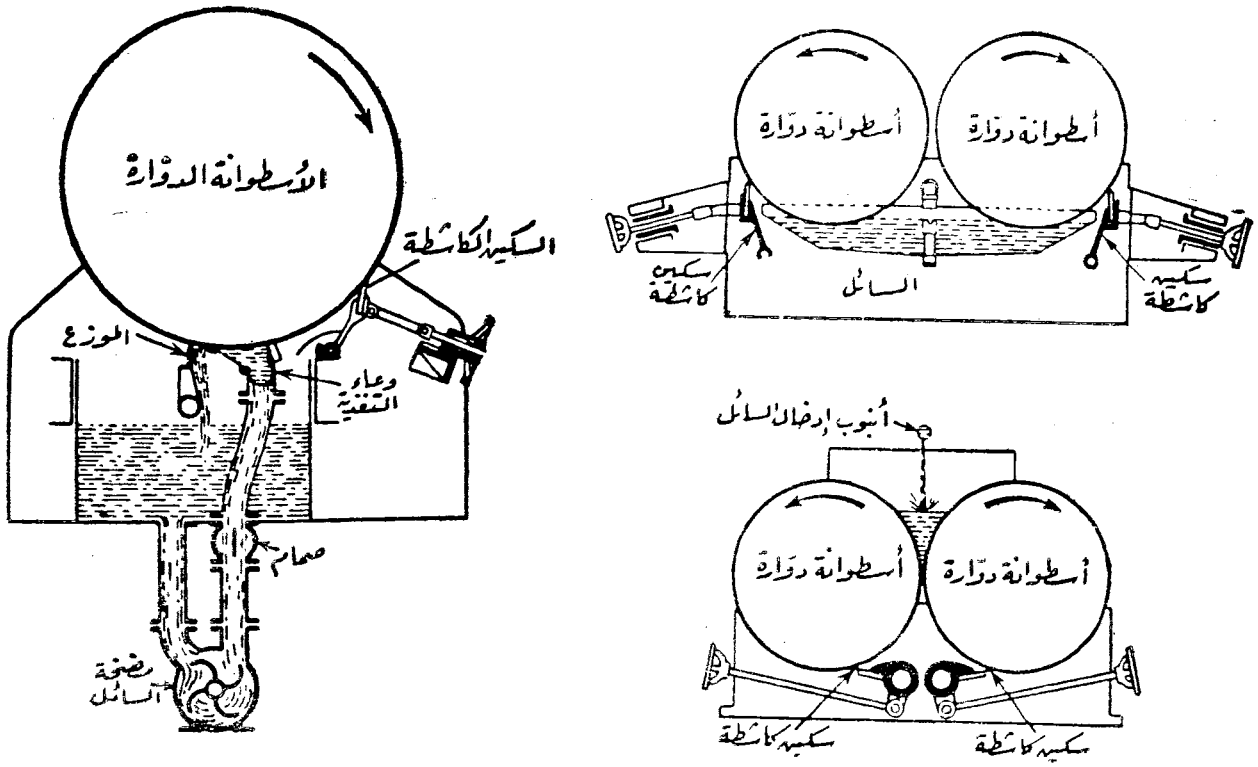
(شكل ١١ ــ ١٢) مجفف متحرك

أجهزة التجفيف التي تتناول المحاليل والمعلقات Materials in Liquids

وهي الاجهزة التي تدخل اليها المواد الخام بشكل سائل • تشبه هذه الاجهزة المبخرات Evaportators في أنها تتناول نفس الاشكال من المواد الخام ، سوى أن المجففات تعطي منتجا جافا وليس سائلا مكثفا كما في حالة أجهزة التبخير • تقسم هذه المجففات الى نوعين رئيسيين :

١ ــ المجففات الطبلية Drum Dryers :

تتألف المجففات الطبلية أساسا من أسطوانة قصيرة مسخنة داخلا بالبخار الحار • فالسائل الذي ينسكب على هذه الاسطوانة الدوارة يجف بتأثير حرارة



(شكل ١٢ ــ ١٢) المجففات الطبلية المفردة والمزدوجة

هــذه الاسطونــات ، وبالتــالي فان المادة المجففــة يحصل عليها في نهايــة دورة الاسطوانة ، وذلك بواسطة سكين كاشطة مناسبة •

والمجففات الطبلية قد تكون مؤلفة من أسطوانة واحدة ، يرذ السائل عليهــا من الاسفل أثناء دورانها • فالسائل الذي يلتصق بهذه الاسطوانة لا يلبث أن يجف بسبب حرارة الاسطوانة ، حيث يكشط قبل أن يرذ السائل مرة ثانية عليها وهكذا (انظر الشكل المرفق) • كما يمكن أن يتألف الجهاز مــن اسطوانتين تــدور كل منهما بشكل يعاكس الاخرى • تغذى المحاليل أو المعلقــات الى هاتين الاسطوانتين إما من طرفهما العــلوي أو السفلي ، وذلك بوسيــلة مناسبة • تحتوي المجففــات الطبلية ، سواء أكانت مؤلفة من اسطوانة واحــدة أم اثنتين ، موزعا يلي المنطقــة التي يأخذ فيها الطبل سائله • ووظيفة الموزع هو مجانسة السائل العالق على الطبل حتى لا يلتصق بطبقات مختلفة الثخانة ، مما يؤدي الى عدم تجانس المنتج •

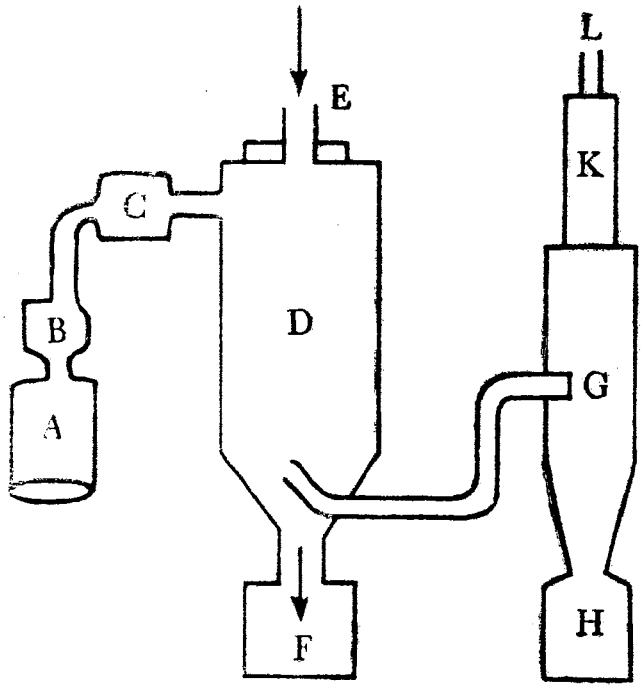
وادخال المادة من الاسفل يتم إما بواسطة سائل تغطس فيه الاسطوانات ، أو بواسطة ارذاذ مناسب ، أوبأية وسيلة أخرى مناسبة • وعلى كل أسطوانة سكين كاشطة للحصول على المنتج النهائي الجاف ، الذي يشكل طبقة من المواد تعلق على المجفف •

والاشكال التي سبق ذكرها تعمل في الضغط الهوائي العادي (Atmosphere Drum Dryers) ، حيث يجري العمل ضمن الشروط العادية من الهواء والضغط الجوي والحرارة المرتفعة • أما في حالة المواد الحساسة للحرارة أو التي تتأثر بالهواء وما يحتويه من أوكسجين ، فان العملية كلها يمكن أن تجري في حيز مغلق مفرغ من الهواء ، حيث يساعد هذا التفريغ في الحصول على تجفيف سريع للمادة الخام بحرارة أقل من المجففات الطبلية الهوائية •

٢ ـ المجففات الارذاذية Spray Dryers :

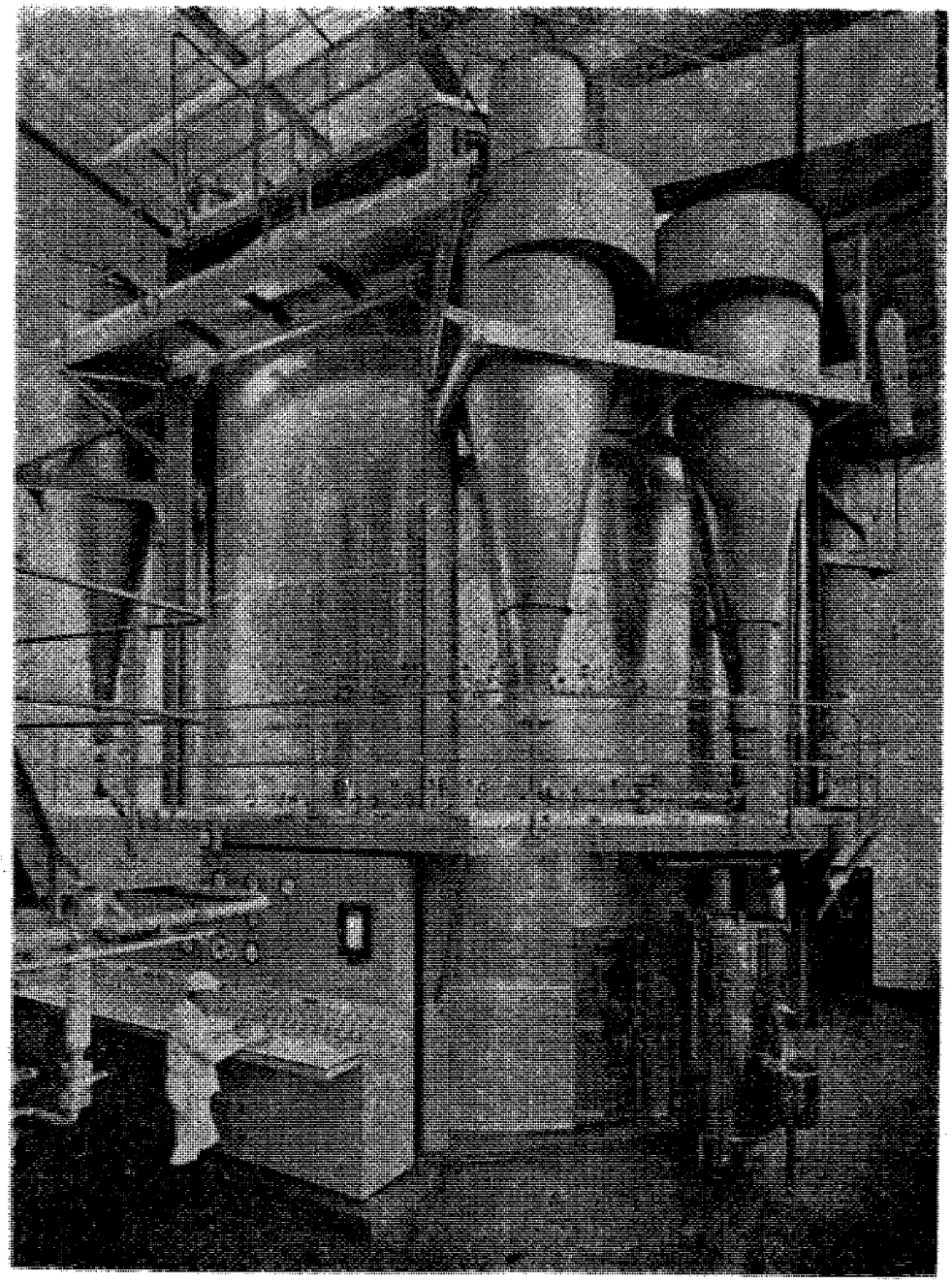
هذه الطريقة في التجفيف كثيرة التطبيق على المنتجات الحساسة والمواد الصيدلانية • فالماء الموجود في داخل المحاليل والمعلقات يمكن نزعه فيما اذا رذ هذا السائل في داخل حيز ، يجري فيه تيار من الهواء أو الغاز المسخن • فالسائل يرذ بشكل قطرات صغيرة جدا في تيار من الغاز الساخن • ففي هذه الحالة يكون التجفيف في غاية السرعة ، وذلك نظرا لضخامة سطح التماس بين المادة المراد تجفيفها وبين الوسط الساخن ، كما ينجم عن ازدياد السطح النوعي الى حد كبير ، مع انخفاض أبعاد القطرات ، أن تكون كمية الماء المنتقلة من السائل الى الهواء كبيرة • وبالاضافة الى ذلك ترتفع كمية الحرارة المنتقلة من الهواء الى السائل نظرا لعظم سطح التماس • ومن جهة أخرى فان سرعة حمل الرطوبة من السائل الى الهواء تكون كبيرة نظرا لازدياد سرعة تيار الهواء الحار في هذا الجهاز •

وكمثال على هذه الاجهزة الشكل (١٣ ـ ١٢) ، حيث A يمثل مدخل الهواء ، وهو عبارة عن كيس قماشي تليه مروحة كهربائية تسحب الهواء ، حيث



(شكل ١٣ ــ ١٢) **جهاز التجفيف الارذاذي** (Spray Dryer)

يرتشح من الكيس B • **يمر الهواء الرائح بعدها على مجموعة مقاومة** كهربائية C أو أية وسيلة تسخين مناسبة ، ترفع درجة حرارته الى حدود تتراوح بين /٨٠/ الى /١٠٠/°م ، وذلك بالنسبة للاجهزة التي تتناول مواد حساسة بالحرارة • يرسل الهواء المسخن ضمن أنبوب ، حيث يدخل بصورة مماسية الى حيز التجفيف D فهذا المدخل المماسي يعطي الهواء تسارعا كبيرا في داخل غرفة التجفيف ، التي تتصل في أعلاها مع نافثة للسائل E ، ترذ المادة المراد تجفيفها قطرات دقيقة في داخل حيز التجفيف • تصادف هذه القطرات الدقيقة تيار الهواء الدائر في حيز التجفيف • فبتأثير سطح التماس الكبير بين القطرات وبين الهواء المسخن ، وبتأثير سرعة الهواء ، فان قطرات السائل تجف خلال مدة قصيرة من الزمن (٣٠ ثانية) ، حيث تنحدر الاجزاء المجففة الى أسفل الجهاز بشكل مسحوق ناعم يسقط في الوعاء F . فالاجزاء الخشنة نسبيا هي التي تسقط في الوعاء F ، بينما يحمل الهواء معه الاجزاء الناعمة في أنبوب نقل الهواء الى الفاصل الدوامي G . أما الاجزاء غير الراسبة ، والتي تكون أكثر نعومة فانها تحمل مع تيار الهواء الذي



(شكل ١٤ ــ ١٢) مجفف ارذاذي للحليب

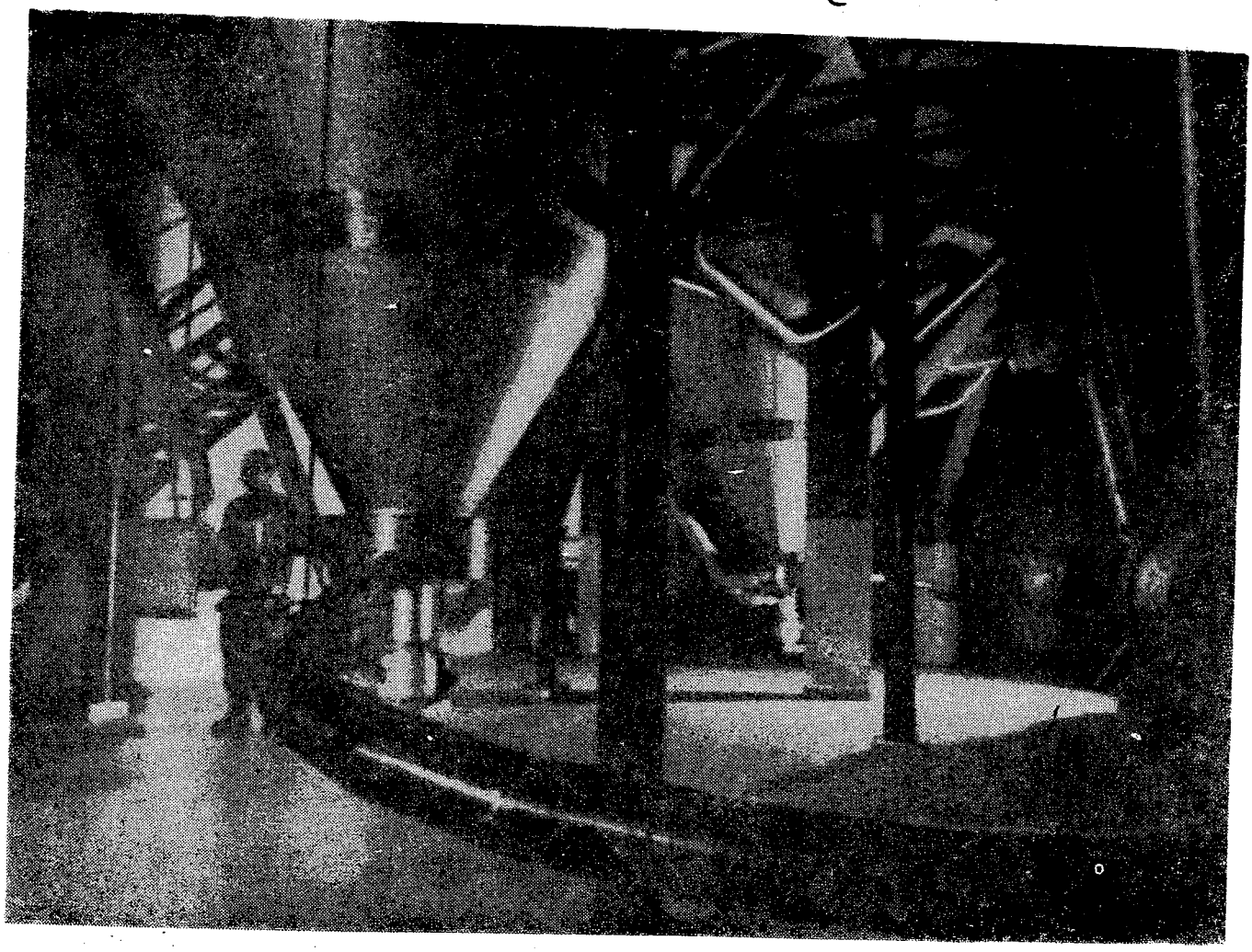
يغادر الفاصل الدوامي من الفتحة العلوية ، ليمر على كيس قماشي K ، هو بمثابة وسط راشح لهذا الهواء ، حيث تحتجز هذه الاجزاء ، بينما ينطلق الهواء من خلال الفتحة L الى الجو الخارجي . أما الاجزاء الانعم فانها بتأثير ثقلها وبتأثير

الحركة الدوامية داخل الفاصل الدوامي ، تسقط من أسفل الفاصل الى وعاء الجمع H

يتألف الجهاز النافث في هذا المجفف من مضخة ضاغطة تعطي ضغطا يتراوح بين ٣٠ ــ ٣٣٠ كغ/سم٢ ، ومن ثقوب صغيرة يتراوح قطرها بين ٠٣ر٠ــ٣٧ر٠سم فالضغط الهائل بالاضافة الى هذه الممرات الضيقة تعطي قوة تحطيمية للسائل المنفوث ، بحيث ينبعث بشكل قطرات دقيقة .

ومن ميزات طريقة التجفيف الارذاذي :

١ ــ التجفيف السريع للمنتجات المتداولة ، حيث تأخذ هذه العملية وقتا يقل



(شكل ١٥ ــ ١٢) مجفف ارذاذي للحليب

عن ٣٠ ثانية ، وهذه ميزة كبيرة خصوصا في حالة المنتجات الحيوية التي تتأثر بالحرارة • فالتعرض الطويل للحرارة يفقد هذه المنتجات فعاليتها ويفسدها كليا أو جزئيا •

٢ ــ تعطي هذه الطريقة منتجا متجانسا بشكل كرات مجوفة خفيفة (مما يمكن أن تطبق معه في بعض الصناعات الصيدلانية كصنع الحثيرات من المواد الخاملة) •

٣ ــ لا ترتفع درجة حرارة المواد المجففة ، على الرغم من استعمال الهواء الساخن ، وذلك لان المادة تجف بسرعة شديدة قبل أن ترتفع درجة حرارتها • ولهذا فان هذه الطريقة يمكن استخدامها في تجفيف خلاصات القهوة والحليب وعصير الفواكه ، دون أن تفقد هذه المواد صفاتها الاساسية من الطعم والرائحة •

ومن عيوب هذه الطريقة تكاليفها الباهظة بالنسبة للمنتج الذي تعطيه ، وهذا المردود الاقتصادي الضئيل يتحسن اذا كان الجهاز كبيرا • كما أن الطريقة غير عملية في حالة الكميات الضئيلة المخبرية • وبالاضافة الى ذلك فهنالك ضياع كبير في الحرارة وخصوصا في الفواصل الدوامية •

تطبق طريقة التجفيف الارذاذي في المنتجات الغذائية مثل الحليب والقهوة والجيلاتين ، وبعض المنتجات الصيدلانية ، مثل المضادات الحيوية والكاربوكسي ميتيل سللوز ، وكبريتات الحديد وغيرها • وقد اقترح البعض ادخال عوامل فعالة على السطح في المواد المراد تجفيفها وذلك لزيادة انتشار وسيولة المادة المعاملة •

تطبيقات أخرى للمجففات الارذاذية Other Applications of Spray Dryers :

مع الاستعمال الواسع للتجفيف الارذاذي فقد امتدت تطبيقاته لتشمل أغراضا أخرى غير التجفيف فهو يستعمل بنجاح للتغليف ولتكوين المحافظ Encapsulation ، والحصول على الزيوت المطيبة الجافة •

المجففات الفجائية Flash Dryers :

حسب هذه الطريقة فان المـادة المراد تجفيفها تجزأ الى أبعاد دقيقة جـدا في تيار من الهواء الحار وشديد السرعة ، حيث تنجرف هذه الاجزاء مع تيار الهـواء بصورة كاملة • وتجف أجزاء المـادة بصورة آنية ومع سير العمـل تكون هنالك وسيلة لتبريد الاجزاء السابحة في تيار الهواء بمجرد جفافها •

المجففات بالتثليج Freeze Dryers :

وهي من طرق التجفيف التي أصبحت الآن تجد لها طريقا في مجالات صناعية متعددة ، لذا فسيفرد لها فصل مستقل بصورة تامة •

الدراسة النظرية للتجفيف Theory of Drying :

في عملية التجفيف هنالك تبادل في محتوى الرطوبة بين الهـواء الحار وبين المادة المراد تجفيفها ، وبالمقابل يحصل تبادل حروري بجهة معاكسـة بين الطرفين ، فالاطراف التي تدخل في التبادل المائي والحراري لا تكون لها صفات واحدة مـن الرطوبة والحرارة بحيث يمكن تفريقها حسب ما يلي :

محتوى المادة من الرطوبة Moisture Content :

ويجري التعبير عنه بكمية الماء بالنسبة المئوية للمادة الجافة •

الهواء الجـاف Dry Air :

وهو الهواء الـذي يحتوي على الغازات غير القابلـة للتكاثف في الدرجات العادية من الحرارة •

الهواء الرطب Moist Heat :

وهو الهواء الذي يحتوي على الغازات غير المتكاثفة في الدرجات العادية مـن الحرارة ، اضافة الى غازات أخرى قابلة للتكاثف وهي بخار الماء •

رطوبة الهواء Humidity (H) :

وهي كتلة الماء المحمولة على واحدة الكتل من الهواء الجاف •

رطوبة الاشباع Saturation Humidity :

وهي رطوبة الهواء الذي يكون مشبعا ببخار المـاء ، أي أن الهواء يكون في حالة توازن مع الماء عند درجة الحرارة والضغط المعنيين • وبتعبير آخر فانها كتلـة الرطوبة المحمولة على واحدة الكتل من الهواء الجاف، وذلك عند وصولها للاشباع•

الرطوبة النسبية Relative Humidity :

وهي النسبة بين رطوبة الهواء وبين رطوبة الاشباع •

$$\text{الرطوبة النسبية} = \frac{\text{رطوبـة الهـواء}}{\text{رطوبة الهواء المشبع ببخار الماء}}$$

وهي تساوي كذلك النسبة بين ضغط بخار الماء في الهواء ، وبين ضغط بخار الماء عند مرحلة الاشباع ، وذلك في درجة الحرارة والضغط المعنيين •

الرطوبة المئوية أو الرطوبة النسبية المئوية

Percentage Humidity = Percentage Relaive Humidity (%H) :

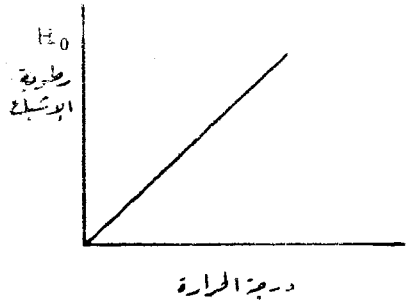
وهي النسبة المئوية للرطوبة النسبية أي تساوي :

$$\frac{H}{Ho}\,100 = 100 \times \frac{\text{رطوبـة الهـواء}}{\text{رطوبة الهواء المشبع ببخار الماء}}$$

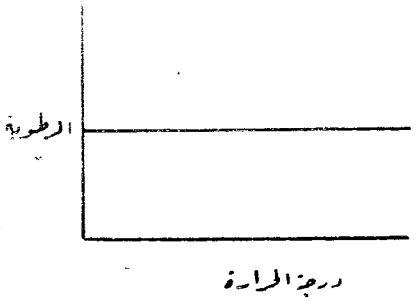
كما تساوي الرطوبة المئوية للنسبة بين ضغط بخار الماء في الهواء على ضغط بخار الماء في درجة الاشباع وبعد ضربها بمائة ، عند درجة الحرارة والضغط المعنيين•

والعلاقة بين درجات الحرارة وأنواع الرطوبة المختلفة يمكن تمثيلها بالخطوط البيانية التالية (شكلي ١٦ ــ ١٢ ، ١٧ ــ ١٢) •

اذا أخذنا نموذجاً من الهواء ورفعنا درجة حرارته ، فان رطوبته لن تتغير ، بينما تزيد رطوبة الاشباع مع ارتفاع درجات الحرارة • وبما أن الرطوبة النسبية هي حاصل قسمة الرطوبة على رطوبة الاشباع $\frac{H}{Ho}$ ، فعند ارتفاع درجات الحرارة تنخفض الرطوبة النسبية ، وذلك بفعل ازدياد المخرج بصورة مستمرة •



(شكل ١٦ ــ ١٢)
العلاقة بين درجة الحرارة ورطوبة الاشباع



(شكل ١٧ ــ ١٢)
العلاقة بين الحرارة والرطوبة

نقطة الندى Dew Point :

وهي درجة الحرارة التي يبدأ فيها بخار الماء بالتكاثف عندما يبرد الهواء • كما يمكن تعريفها ، بأنها درجة الحرارة التي تصل فيها رطوبة الهواء الى درجة الاشباع ، وذلك عن طريق رطوبة الهواء الذاتية فقط • ويحصل على نقطة الندى بأن يؤخذ نموذج من الهواء ويبرد • فرطوبة الهواء تبقى ثابتة ، بينما رطوبة الاشباع تتناقص مع انخفاض درجات الحرارة • أي أن الرطوبة النسبية سوف تزداد حتى تصل الى الحد الاعلى عندما تتساوى رطوبة الهواء مع رطوبة الاشباع • فأي انخفاض في درجة الحرارة بعد ذلك سوف يؤدي الى تكاثف الماء الزائد عن رطوبة الاشباع بشكل الندى ، وذلك على السطوح الباردة •

هذا ويتضمن التجفيف انتقالا للمادة (الماء) وانتقـالا للطاقة بالجهة المقابلة (الحرارة) فتقديم الحرارة الى الجسم المراد تجفيفه عملية أساسية وذلك كحرارة تحويل للماء من الحالة السائلة الى الحالة الغازية (حرارة تبخر) . وانتقال المـادة نراه خلال نفوذيـة الماء عبر الجسـم المجفف وحتى سطحه ، ومـن ثم تبخر هذا الماء من السطح وانتقال البخار من سطح الجسم الى تيار الهواء المار .

فاذا درسنا هذا الانتقال والتبخر الذي يحصل على سطح الجسم كان معدل التبخر للماء على سطح الجسم يحكم بالمعادلة التالية :

$$\frac{dw}{d\theta} = \frac{q}{\lambda}$$

حيث :

$\frac{dw}{d\theta}$ تمثل معدل التبخر (كمية الماء خلال واحدة الزمن) .

q معدل انتقال الحرارة الكلي (كمية الحرارة المنتقلة في واحدة الزمن) .

λ حرارة تبخر المـاء .

وبالجهة المقابلة فان انتقال الماء مـن الجسم الى الهواء يمكن أن يعبر عنـه بمعادلة شبيهة بالسابقة (12 - 1) وتكون القوة الدافعة لهذ االانتقال هي فرق الرطوبة

$$\frac{dw}{d\theta} = K'A\ (H_s - H_g) \qquad (12 - 2)$$

حيث :

$\frac{dw}{d\theta}$ معدل انتقال الماء (كمية الماء خلال واحدة من الزمن) .

K' ثابتة انتقال المادة (Coefficient of Mass Transfer)

A مساحة السطح المعرض للتجفيف من الجسم •

H_s الرطوبة المطلقة للهواء الملامس للتبخير •

H_g الرطوبة المطلقة للهواء المار •

ومما يجدر ذكره أن K' ليست لهـا قيمة ثابتة بـل هي تتغير مع سرعة تيـار الهواء المار على الجسم •

وعند تعريض الجسم لتيار من الهواء تكون في البـداية فترة توافق يتعـادل بعدها معدل التبخير مع معدل انتقـال الماء أو البخار ، بحيث تتساوى المعادلتـان (2 - 12 , 1 - 12)

$$\frac{dw}{d\theta} = \frac{q}{\lambda} = K' A (H_s - H_g) \qquad (3 - 12)$$

كما يمكن أن تكتب المعادلة السابقة كما يلي :

$$\frac{dw}{d\theta} = (q_c + q_r + q_k) \lambda = K' A (H_s - H_g) \qquad (4 - 12)$$

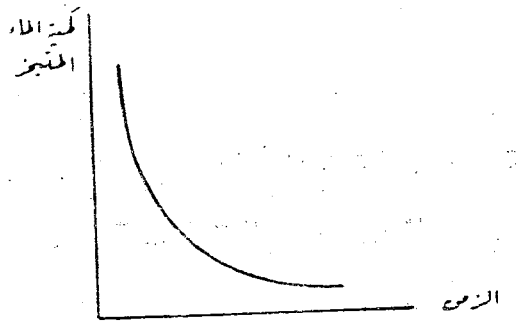
حيث القيم بين القوسين تمثل عوامل انتقال الحرارة بالحمل والاشعاع والتوصيـل بالترتيب ، وقد استعيض بها عن عامل انتقال الحرارة الكلي •

ومن الواضح بالمعادلة السابقة أن أية زيادة في قيم طرف المعادلة سوف تؤدي الى زيادة معدل التبخير وبالتالي معدل التجفيف ، فزيادة q_r عامل انتقـال الحرارة بالحمل يزداد مع ازدياد درجة حرارة الهواء الداخل • بينما يزداد q_c عامل انتقـال الحرارة بالاشعاع عن طريق زيادة درجـة حرارة المصدر الحراري الـذي يسخن الهواء زيادة كبيرة (انظر في انتقال الحرارة بالاشعاع في بحث المسخنات ومبادلات

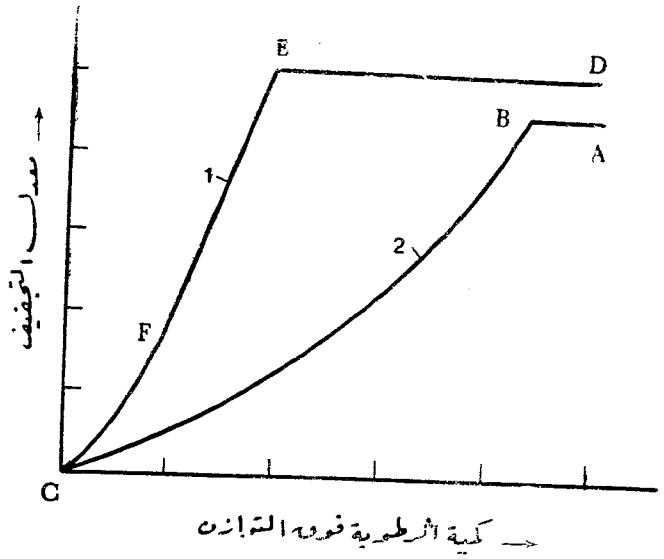
الحرارة) • وأخيرا فان العامل q_k عامل انتقال الحرارة بالتوصيل يرتفع مع تخفيض ثخن الجسم المعرض للتجفيف وزيادة تماس الجسم مع المنبع الحروري • وكما سبق وبينا فان زيادة K' تتحقق عن طريق زيادة سرعة الهواء المار والقيمة ($H_s - H_g$) يمكن زيادتها وبالتالي رفع معدل التجفيف عن طريق انقاص Hg وهي رطوبة الهواء المار •

الدراسة النظرية لتجفيف المواد الصلبة :

عندما يجري تداول المواد الصلبة في أجهزة التجفيف فان ما يحكم حجم الجهاز هو معدل التجفيف ومعدل المنتج المطلوب ، وطبيعة المادة المعرضة للجفيف • ويمكن قياس معدل التجفيف عن طريق تعليق المادة الرطبة على ميزان في حيز التجفيف ومن ثم قياس نقص وزن النموذج بدلالة الزمن • واذا تم قياس محتوى الرطوبة بدلالة الزمن لجسم معين فاننا نحصل على الخط البياني التالي (١٨ــ١٢) • وتتوضح عملية التجفيف اذا رسمنا الخط البياني لمعدل التجفيف بدلالة محتوى الرطوبة (أو بالاحرى محتوى الرطوبة فوق التوازن أو الرطوبة القابلة للتجفيف) فعندما يعرض جسم ما للهواء عند درجة معينة من الحرارة والرطوبة ، فان هذا الجسم يخسر كمية من الماء أو أن محتوات من الرطوبة ينخفض حتى نصل الى مرحلة من التوازن في الرطوبة بين الهواء والجسم المعرض ، بحيث ان عدد جزيئات الماء التي تدخل الجسم يساوي عدد الجزيئات الخارجة منها • ومحتوى الجسم من الرطوبة عند مرحلة التوازن هذه له علاقة بطبيعة



(شكل ١٨ ــ ١٢)التجفيف بدلالة الزمن

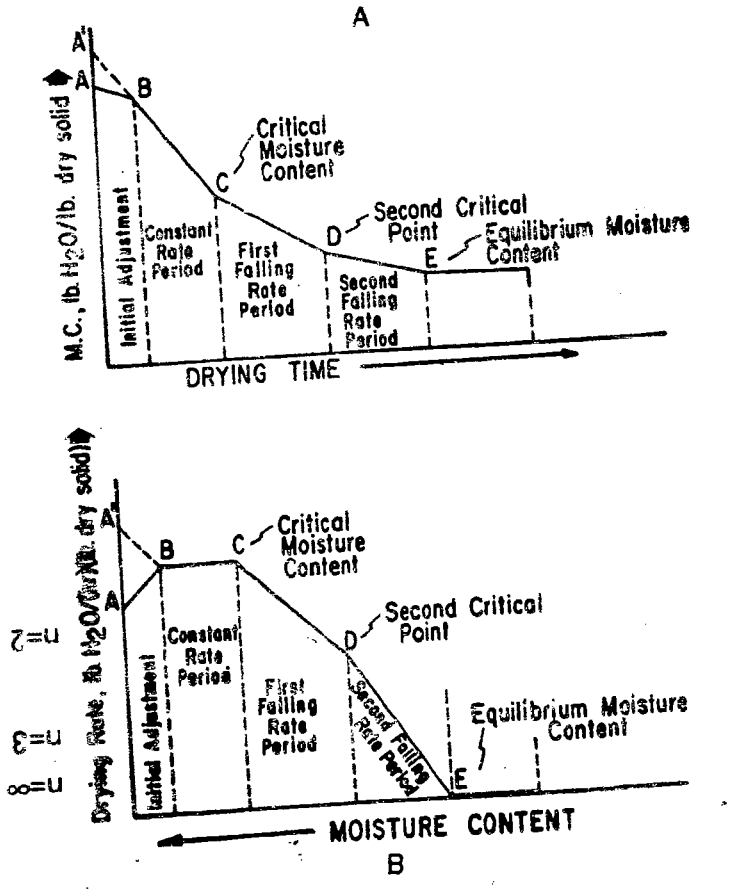


(شكل ١٩ ــ ١٢) معدل تجفيف المواد بدلالة الرطوبة

الجسم الفيزيائية ، ومدى احتفاظه بالماء ، كما له علاقة برطوبة الهواء النسبية وبدرجة الحرارة التي يتم عندها التوازن • كما أن سرعة الوصول الى هذا التوازن تختلف حسب طبيعة الجسم المجفف ، وحسب الفروق في درجات الحرارة ، وحسب شدة حركة الهواء • كذلك يتعلق معدل التجفيف بسرعة تحرك الرطوبة من الداخل الى الخارج ، وبعوامل أخرى • فالنشاء الذي يتعرض الى الهواء بدرجة رطوبة مئوية ٦٠ ٪ فان محتواه من الماء سوف يكون بحدود ١٥ ٪ عند مرحلة التوازن ، بينما في أحوال أخرى لمواد ذات طبيعة مغايرة مثل التالك فان كمية الرطوبة في مرحلة التوازن تكون أقل بكثير من حالة النشاء •

وعندما يعرض جسم صلب رطب الى عمل جهاز تجفيف فانه يبتدىء بامتصاص الحرارة فترتفع درجة حرارته وبالمقابل لا تلبث الرطوبة أن تبتدىء بالتبخر مبردة الجسم المعرض للتجفيف • وبعد فترة من التوافق بين التسخين والتبريد ليتعادلا وتثبت درجة الحرارة ، ونرى فترة التوافق في الشكلين (٢٠ ــ ١٢ آ ، ب) ممثلة بالخط AB •

وعند النقطة B تثبت درجة الحرارة وتبقى ثابتة طالما بقيت طبقة رقيقة من



(شكل ٢٠ ــ ١٢) مراحل التجفيف

الرطوبة على سطح الجسم المجفف • وبين النقطتين C , B تكون كمية الرطوبة المتبخرة مكافئة للرطوبة المنتقلة من داخل الجسم الى السطح • وخلال هذه الفترة يتصف معدل التجفيف بالثبات ، ويدعى الخط BC بفترة المعدل الثابت •

وعندما ينخفض محتوى المادة من الرطوبة ، بحيث أن سطح المادة لم يعد مشبعا بالماء كما كان من قبل ، فان معدل التجفيف في المرحلة CD يتناقص مع انخفاض محتوى المادة من الرطوبة • وفي هذا تأخذ هذه المرحلة من التجفيف شكل الخط المستقيم الهابط في المنحني • وتكون سرعة نفوذ الرطوبة من داخل المادة الى سطحها دون سرعة انتقال الماء من سطح المادة الى الهواء الخارجي • ويعطي السطح منظرا منقطا من ناحية احتوائه على الرطوبة حيث يظهر الجفاف

الجزئي بشكل نقاط على السطح الرطب • هذه النقاط التي تزداد انتشارا واتساعا مع تقدم العمل في التجفيف • وتسمى هذه المرحلة من التجفيف بمرحلة انخفاض المعدل الاولي • هذا وتمثل النقطة C محتوى من الرطوبة هو المحتوى الحرج من الرطوبة Critical Moisture Content CMC وفي هذه المرحلة ينخفض معدل التجفيف بنسبة نقصان محتوى المادة من الرطوبة • ولهذا فان ميل المنحني في هذه المرحلة يكون ثابتا ، أي أن CD يتخذ له شكل الخط المستقيم ذي الميل الثابت •

وعند النقطة D ، تتبخر طبقة الرطوبة على سطح الجسم بشكل كامل • ويكون معدل التجفيف على معدل انتقال الرطوبة الى سطح الجسم المجفف • وتمثل النطقة D بالنقطة الحرجة الثانية لمحتوى الرطوبة • وبين E , D يهبط معدل التجفيف بصورة متسارعة وذلك بالمقارنة مع الفترة السابقة ، لذا فان الخط DE يكون بشكل منحنى ذي ميل متزايد مع انخفاض محتوى المادة من الرطوبة وتقدم عملية التجفيف •

وعندما نصل الى النقطة E فان معدل التجفيف يساوي الصفر ونكون قد وصلنا الى مرحلة التوازن من الرطوبة حيث لا يجدي بعدها استمرار عمل المجفف•

آلية انتقال الماء في مراحل التجفيف :

عندما تعرض المادة المراد تجفيفها الى تيار من الهواء المسخن فان المادة تفقد ماءها نتيجةً للفرق بين رطوبة الهواء H_s وبين الرطوبة H_e . ففي خلال مرحلة المعدل الثابت ينتقل الماء بواسطة النفوذية والتوصيل ، حيث أن القوة المحركة في التجفيف خلال هذه المرحلة هي الفرق بين H_s H_e . فكلما كان الفرق أكبر كان معدل التجفيف ذا قيمة أكبر •

أما في مرحلة انخفاض المعدل فهنالك نظريتان تعبران عن آلية انتقال الماء من الداخل الى الهواء ، وهما نظرية النفوذ Diffusion Theory والنظرية الشعرية Capillary Theory

وحسب النظرية الاولى فان الماء ينتقل من الداخل الى السطح ومنه الى الهواء بسبب الفرق بين تركيز الماء في طرفي الانتقال • فكلما كان الفرق كبيرا كان انتقال الماء بقيم أكبر • ولهذا السبب فان معدل التجفيف ينخفض مع انخفاض محتوى المادة من الماء ، أي أنه ينخفض مع انخفاض الفرق في تركيز الماء بين طرفي الانتقال وهما المادة والهواء •

وفي النظرية الشعرية فان انتقال الماء من الداخل الى السطح ، ومن ثم الى الهواء المار ، يمكن أن يكون بالطرق الشعرية بين أجزاء المادة المجففة • فالمادة المجففة تخلق بين أجزائها فراغات شعرية باتصالها مع بعضها ، حيث تكون ممرات وأنابيب شعرية • فحسب هذه القوى الشعرية يتمكن الماء من الانتقال من الداخل الى الخارج ، على الرغم من أن فرق تركيز الماء قد لا يكون في صالح هذا الانتقال ، وذلك نظرا للخاصة الشعرية التي تتمتع بها هذه الممرات والانابيب المجهرية • هذه الخاصة التي تمكن الماء من أن ينتقل من داخل المادة وحتى الهواء الخارجي •

تصنيف المواد الصلبة حسب سلوكها في التجفيف :

يمكن أن تصنف المواد الصلبة وفقا لنمط تجفيفها الى ما يلي : ١ ــ المواد الحبيبية Granular أو ذات التركيب البلوري ، ٢ ــ المواد عديمة الشكل Amorphous. فالمواد التي تنتمي الى الصنف الاول لا تمسك بالرطوبة بنفس القوة التي نراها في الصنف الثاني • فالماء موجود في سطوح مفتوحة ذات غور قليل أو في فتحات داخلية ولكن يسهل وصول محتواها الى السطح • وبالمقابل فان الرطوبة في أجسام الصنف الثاني تكون محتواة في فتحات شعرية داخلية أو أن الرطوبة تدخل في التركيب الخلوي لهذه الاجسام • خط DEC

والخط البياني الذي سبق شرحه (شكل ١٩ ــ ١٢) يمثل المواد الحبيبية والبلورية ، فالمعدل الثابت يشكل المرحلة الرئيسية في عملية التجفيف • وتكون

فترة انخفاض المعدل قصيرة بالمقارنة مع مرحلة المعدل الثابت • تنتمي الى هذا الصنف أكثر المواد اللا عضوية ذات الحساسية الضئيلة للحرارة • وعادة تكون قيمة رطوبة التوازن متدنية حتى لتكاد تقترب من الصفر • ومن مواد هذا الصنف الرمل وكبريتات الكالسيوم وأوكسيد التوتياء وأوكسيد الماغنزيوم •

تتحرك الرطوبة بصعوبة في أجسام الصنف الثاني نظرا لعمق جيوب الرطوبة وانغلاقها بعيدا عن سطح الجسم المجفف • وتتخذ هذه الاجسام لها مرحلة قصيرة للمعدل الثابت حيث تنتهي هذه المرحلة بمحتوى رطوبة حرج ذي قيمة مرتفعة • ومرحلة الانخفاض الاولى تكون قصيرة بل وفي كثير من الحالات تكون معدومة بينما تطول مرحلة الانخفاض الثانية لتمتد على حساب مرحلة الانخفاض الاولى • ومحتوى الرطوبة في مرحلة التوازن يكون هنا بقيمة مرتفعة بالمقارنة بالمواد الحبيبية لأن الرطوبة تبقى متعلقة تعلقا صميميا بالمادة المجففة • وتتأثر صفات هذه المواد من الناحية الفيزيائية والكيميائية عند ارتفاع الحرارة ويتطلب تجفيف هذه المواد درجة حرارة منخفضة مع درجات من الضغط أدنى من النظامية وتيار أسرع من الهواء الجاف ومدةً أطول في التجفيف • تنتمي الى هذا الصنف المواد عديمة الشكل ، والمواد الليفية ، والمواد الجيلاتينية ، ومن بين هذه المواد النشاء ، الكاسئين ، الخميرة ، الانسولين والمواد اللا عضوية الجيلاتينية كماءات الالومنيوم•

تأثير الانكماش (Shrinkage) على التجفيف :

يحصل الانكماش في بعض الاوساط المجففة مثل الاوساط الغرويدية والليفية، كالعقاقير النباتية والمواد الغذائية • فالانكماش الذي يحصل في هذه الاوساط يسبب تغيرات عديدة في المادة ، بحيث تؤثر هذه التغيرات على معدل التجفيف • ومن بين هذه التغيرات أن الانكماش يغير من سطح المادة المعرض لتأثير الهواء المجفف ، حيث أن انخفاض السطح المعرض للهواء يؤدي بالتالي الى انخفاض معدل التجفيف •

والتغير الثاني الذي يحصل للمادة بتأثير الانكماش هو أن السطح المنكمش يتغير من الناحية الفيزيائية ، حيث تصبح الطبقة السطحية مـن المادة أشد قساوة من باقي الكتلة • فهذه الطبقة تشكل سطحـا كتيما لا يسمح بدخول الهواء الى الداخل ، أو انتقال الماء أو بخار الماء من الداخـل الى الخارج • كما تعرقل هـذه الطبقة انتقال الحرارة من الخارج الى الداخل لمعادلة حرارة التبخر في داخل المادة •

تشاهد هذه الظاهرة بشكل واضح في حالة تجفيف المواد الصابونية •

★ ★ ★