

المبادئ الأساسية لفصل الهواء

ينص قانون بويل على أنه عند ثبوت درجة الحرارة يتناسب حجم الغاز عكسياً مع ضغطه وينص قانون شارل على أنه عند ثبوت الضغط فإن حجم الغاز يتناسب طردياً مع درجة حرارته المطلقة . ويمكن بإدماج العلاقتين معاً الحصول على الصيغة الرياضية التالية :

ح ض = ك د حيث ح : حجم الغاز ، ض : ضغطه ، د : درجة الحرارة المطلقة . ك : مقدار ثابت . ويعرف الغاز المثالي « الغاز التام » بأنه ذلك الغاز الذي ينصاع تماماً لهذه العلاقة .

ومن السهولة بمكان حساب الحد الأدنى نظرياً لكمية الطاقة اللازمة لفصل خليط من غازين مثاليين . ولما كانت عملية الخلط لغازين مصحوبة بزيادة في الأنثروبيا * لذلك فإنه لفصلهما يلزم بذل مقدار من الشغل لتقليل هذه الأنثروبيا بنفس المقدار . ويمكن توضيح عملية الحساب بالكيفية التالية :

لنفترض أن الهواء يتألف فقط من ٢١ ٪ من الأكسجين ، ٧٩ ٪ من

* الأنثروبيا : الطاقة التي لا يستفاد بها في النظام الحراري الديناميكي .

النروجين ، وكلا هذين العازين له سلوك الغاز المثالى (العاز التام) والاقراض الأول كما رأينا ليس صحيحاً كلية ولكن الأخير مع ذلك صحيح لدرجة كبيرة . إذ أن الحرارة الناتجة عن خلط الأكسجين والنروجين صغيرة لدرجة يمكن معها إهمالها . ولتخيل احتواء الخليط فى أسطوانة تحت الضغط الجوى ، وهذه الأسطوانة غشاءان شبه منفذين ، أحدهما نفيذ (شبه منفذ) للأكسجين والآخر نفيذ للنروجين ، وعليه يحدث الانتشار حتى يمر جميع النروجين من خلال أحد الغشاءين ويتجمع عند ضغطه الجزئى والذى يساوى ٧٩٪ من الضغط الجوى ، وفى نفس الوقت يتجمع غاز الأكسجين فى الطرف الآخر تحت ضغطه الجزئى والذى يساوى ٢١٪ من الضغط الجوى ، إلى هذا الحد لم يبذل أى شغل على هذه المجموعة الغازية ولكن لكى تتم عملية الفصل ، يجب أن يتعرض كل غاز منهما لضغط مع ثبوت درجة الحرارة ثم عكسياً إلى الضغط الجوى . بالنسبة لغاز النروجين فإن مقدار الشغل الذى يجب بذله = ٠,٧٩ ك : لو $\frac{1}{\gamma_1}$. وبالنسبة لغاز الأكسجين فإن مقدار الشغل اللازم بذله = ٠,٢١ لو $\frac{1}{\gamma_2}$. كما أن الشغل الكلى الذى يتحتم بذله لإتمام عملية الفصل = مجموع هذين المقدارين .

ويجب الإشارة إلى أن هذا الرقم النظرى لا يعتمد تماماً على الطرق العملية المتبعة للفصل . وعملياً ليست هناك عملية يمكن أن تطلق عليها حقيقة أنها عكسية . وتكمن العقبة الكئود فى جميع عمليات فصل الغازات فى ابتكار طريقة تكون عكسية بقدر الإمكان أى لها أعلى كفاءة حرارية ممكنة . وفى عمليات فصل الهواء ، يمثل عاملا القدرة ورأس المال البندين الرئيسين فى التكلفة . ولذلك يُوجّه الجزء الأكبر من العناية فى ترشيد كفاءة العملية إلى الاقتصاد فى استهلاك القدرة وخفضه إلى أقل حد ممكن . ولكن مع ذلك ، فقد وجد عند بعض المراحل أنه يمكن تحقيق

الاقتصاد في استهلاك القدرة فقط على حساب زيادة النفقات في رأس المال .
 وكنتيجة لذلك لا يجرى تشغيل الوحدات الصناعية عند أعلى كفاءة
 يمكن التوصل إليها . كما لا يجرى تشغيلها أيضاً عند أقل تكلفة ممكنة
 لرأس المال ، بل يجرى تشغيلها عند الحد الاقتصادي الأمثل والذي يجمع
 بين الميزتين ويقع في خط وسط بين هذين الحدين .

وتُشيد وحدات فصل الهواء بأنماط مختلفة . لإنتاج واحد أو أكثر
 من مكبرته وفصل واحد أو أكثر من المنتجات في صورة مماثلة . وأيضاً
 للحصول على المنتجات بدرجات متفاوتة من النقاوة . وتتوقف الطريقة
 الدقيقة التي تستخدم عملياً إلى حد ما على تعريف هذه الشروط الأساسية .
 ومع ذلك فإن وحدة تقوم بفصل الهواء سوف تتضمن دائماً ثلاث مراحل
 أساساً : مرحلة التنقية ، مرحلة التبريد ، مرحلة التقطير . ولعملية الانتقال
 الحرارى أهمية تكنولوجية كبرى حتى يمكن المحافظة على فاقد التبريد إلى
 الحد الأدنى .

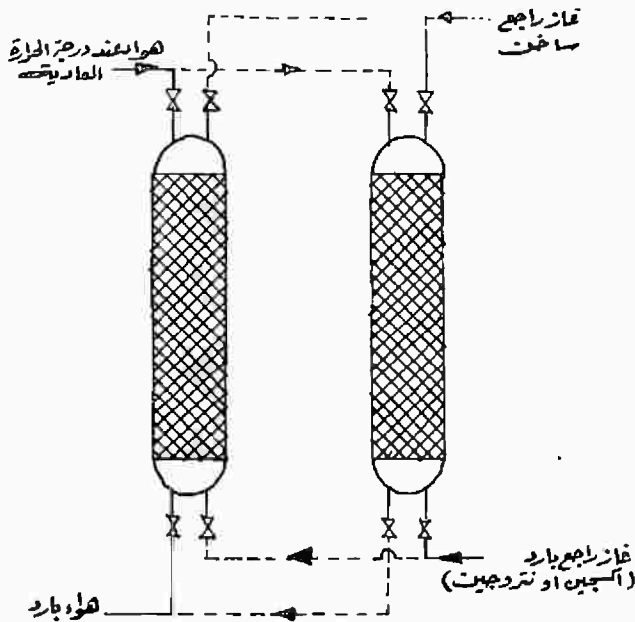
وفيما يلي سنتناول كلا من هذه العوامل لأربعة بالتفصيل .

التنقية :

يعتبر الهواء مخلوطاً معقداً من عناصره بالإضافة إلى غاز ثانى أكسيد
 الكربون وبخار الماء ، وقبل معاملة الهواء فإنه يتحتم إزالة المادتين الأخيرتين
 منه ، وذلك عند تجمدهما في درجات حرارة منخفضة . وهناك العديد من
 الأساليب التي يمكن اتباعها لإجراء عملية التنقية عملياً . وفي الوحدات
 الغازية الصغيرة وفي وحدات الإسالة التي تستخدم ضغوطاً عالية يجرى تنقية
 الهواء قبل دخوله إلى وحدة الفصل . ويستبعد غاز ثانى أكسيد الكربون عادة
 بواسطة محلول كاو من هيدروكسيد الصوديوم تحت ضغط ١٠ جوى ، أى
 بعد المرحلة الثانية في كس الهواء وتمتص الرطوبة بصنعة عامة بمرورها على

محلول غرواني من السليكا أو على ألومينا منشطة، وتكون هذه الوحدات التي تقوم بمثل الدور وحدات مزدوجة أى تزود بوحدات إضافية حتى يمكن تنشيط إحداها بينما تكون الأخرى في التشغيل .

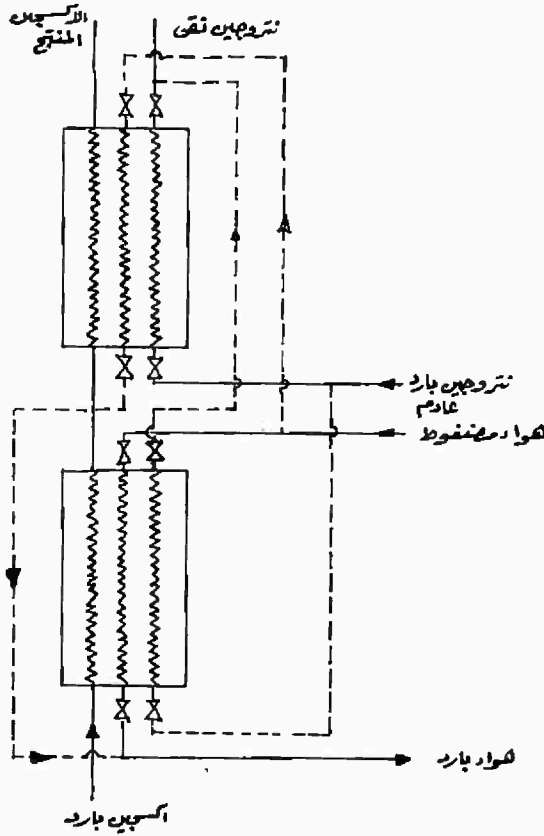
وفي الوحدات الغازية الكبيرة التي تعمل تحت ضغوط منخفضة ، ٦ ضغط جوى على سبيل المثال ، يمكن التأثير على عملية التنقية بواسطة المسترجعات كما في الشكل (٢١) . ويعتمد تشغيل مثل هذا المبدأ على مرور تيار



شكل (٢١)

بين مولدات الغاز

الهواء الوارد خلال وعاء يحتوى على مادة حشو تبرد تلقائياً بواسطة المنتجات الباردة التي تغادر الوحدة ، فيتجمع كل من ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء على مادة الحشو في حالة جامدة (صلبة) . وبالعكس الدورة تمر المنتجات



شكل (٢٢)
مبادل حراري عكسي

الباردة - التي تم إنتاجها في الوحدة فقط - خلال مادة الحشو ثم تعود بعد ذلك إلى المسترجعات حيث تغادر الوحدة بعد ذلك . وينشأ مثل هذا الوضع بصورة طبيعية في المنتجات التي تتضمن شوائب ولكنها تستخدم على نطاق واسع .

وتتميز المسترجعات بفضخامة حجم الغاز المسترجع قياساً إلى حجم الغاز

الداخل لاختلاف الضغط بينهما ، إذ يكون الغاز المسترجع تحت ضغط أقل . ومن ناحية أخرى فإن درجة حرارة الغاز المسترجع عند أية نقطة في المسترجع تكون أقل منها للهواء الداخل . مما يعنى أن درجة التشبع ببخار الماء وبغاز ثانى أكسيد الكربون تكون أقل . ومع ذلك فإنه يمكن تحقيق إعادة كاملة لعملية التصعيد (التبخر) بالوصول إلى درجة حرارة عظمى بعينها . وهناك طريقة أخرى بديلة يمكن من خلالها تلافى عملية تلوث المنتجات وذلك باستخدام مسترجعات انعكاسية . ويوضح الشكل (٢٢) استخدام المسترجعات الانعكاسية عند تحضير الأكسجين نقياً ، حيث يمر الأكسجين الذى يغادر الوحدة بصورة مستمرة خلال المبادل الحرارى بينما يتم تحويل كل من الهواء الداخل والتروجين المنصرف تبادلياً خلال المبادل حتى يتكثف ثانى أكسيد الكربون وبخار الماء . وبعكس المبادلات الحرارية يحدث انخفاض فى الضغط خلال المعدات مما يستلزم معه مد المجموعة بقدرة إضافية .

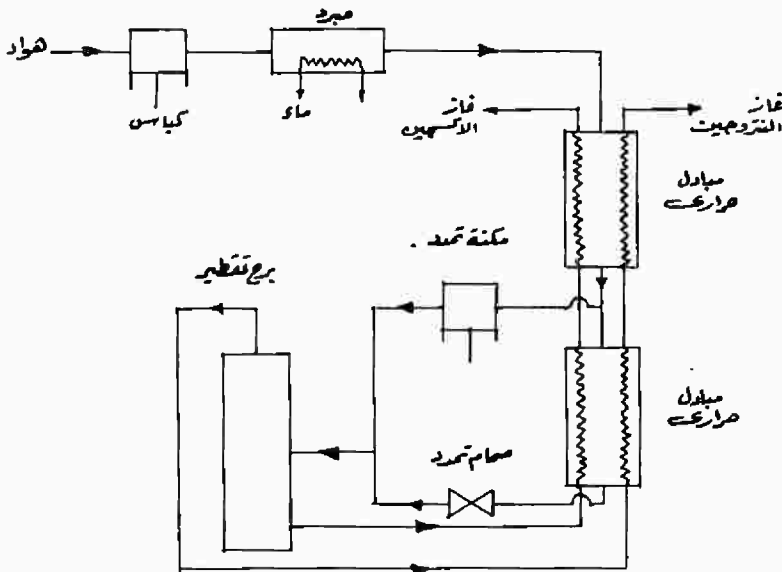
التبريد :

ما إن تم تنقية الهواء حتى يكون معداً للتبريد وفى النهاية يتحول إلى سائل سواء تم ذلك ببذله شغلا خارجياً فى ماكينة تمدد ، أو باستخدام تمدد جول - طومسون ، أو بإدماج هاتين الطريقتين سوياً . وبرغم أن طريقة الشلال التى ذكرت آنفاً ، متميزة وتجذب الانتباه من الناحية الديناميكية الحرارية إلا أنها لا تستخدم إطلاقاً فى عمليات فصل الهواء وذلك لصعوبة توفير مخزون وفير من المواد الوسيطة التى لها نقاط غليان ملائمة ، ولعدد الكباسات اللازمة وأيضاً إلى خطورة تلوث المنتج بالتسرب داخل الوحدة .

وسوف يفهم بوضوح أن الشغل الوحيد اللازم عمله بالنسبة لخليط من غازات مثالية يدخل الوحدة عند درجة حرارة الغرفة ثم يغادر الوحدة كمنتجات

منفصلة عند نفس درجة الحرارة وهو الشغل اللازم لعملية الفصل . ومع ذلك فإنه عملياً تكون عملية التبريد مطلوبة ليس فقط لخفض درجة حرارة الوحدة ، بل أيضاً لتعويض التسرب الحرارى خلال المادة العازلة ، والفقد الحرارى مع المنتجات المنصرقة من الوحدة عند درجات حرارة دون درجة حرارة الجو ، فإذا ما سحب أحد المنتجات كسائل ، كانت عملية التبريد أمراً حتمياً ، إذ أن هذا المنتج سوف يسحب معه كمية محسوسة من البرودة بالإضافة إلى كمية البرودة الكامنة لديه ، أى أن البرودة ليست نتيجة للدرجة الحرارة المنخفضة فحسب بل أيضاً نتيجة للحرارة الكامنة للتكثف .

وتتضمن المراحل الرئيسية استخدام ماكينة تمدد ، بالإضافة إلى الإستعانة بتأثير جول - طومسون ، كما هو موضح بالشكل (٢٣) . ويضغط



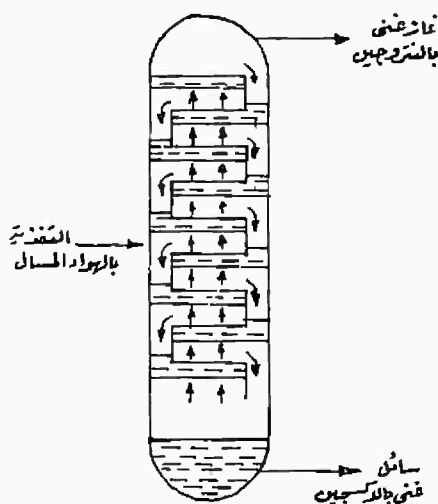
شكل (٢٣)

يوضح دورة إسالة مسطحة

الهواء المتقى إلى ضغط مناسب ثم يعاد إلى درجة حرارة الغرفة بتبريده بالماء ، وعندئذ يتبادل حرارته مع المنتجات المنصرقة الباردة كما ينتقل جزء من هذه الحرارة إلى آلة تمدد . ويعمل الشغل الذى يفرض أدائه على تبريدها أكثر . ثم يمر الهواء المسال جزئياً إلى عمود التكسير . ويمر باقى الهواء من خلال مبادل حرارى ثان ثم من خلال صمام تمدد ثم يتوجه بعد ذلك إلى العمود . ذلك إلى العمود .

التكرير :

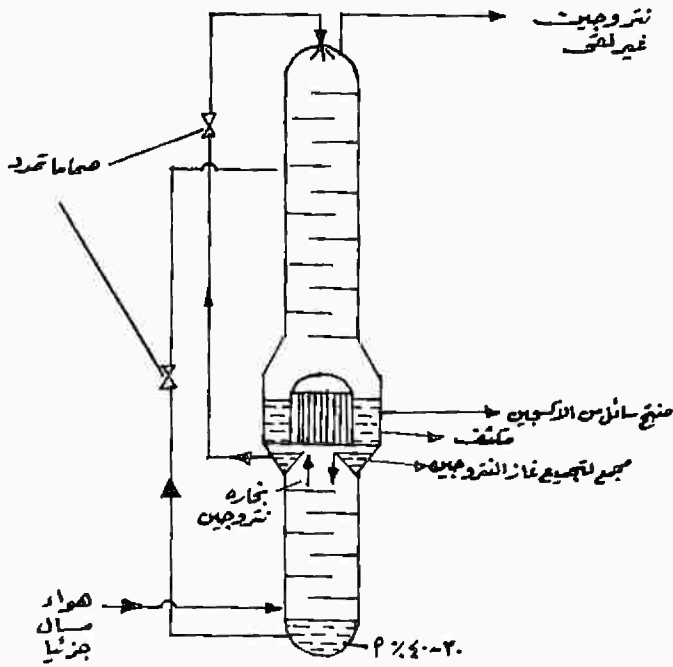
للتبسيط - دعنا نتخيل أن الهواء يتألف من مجموعة من مكونين بسيطين هما غاز الأكسجين الذى يغلى عند حوالى - ١٨٣°م تحت الضغط الجوى ، والنيتروجين الذى يغلى عند ١٩٦°م تحت هذا الضغط . فإذا مر الهواء المسال إلى عمود تقطير (كما فى الشكل ٢٤) . فإنه يمكن فصله إلى غاز غنى بالنيتروجين



شكل (٢٤)

برج بسيط لتقطير الهواء

ينصرف عند قمة البرج ، وسائل غنى بالأكسجين يستقر على قاع البرج ومع ذلك فإنه لكي نحصل على منتجات نقية بدرجة معقولة ، فإنه يتجنب الحفاظ على فرق في درجة الحرارة بين قمة وقاع البرج ، كما يجب توفير التدفق عند القمة بتروجين سائل بدرجة نقاء معقولة ، ولما كان غاز النتروجين الذى ينصرف من العمود هو أبرد مادة متاحة به ، فإنه يستحيل توفير التدفق المطلوب في عمود بسيط وتطبق الطريقة عملياً لمعالجة هذه المسألة باستخدام جهاز ابتكره فرن لنيو عام ١٩١٠ ويعرف باسم « البرج المزدوج » ويتألف هذا العمود المزدوج كما هو موضح بالشكل (٢٥) من برجين متواشجين أحدهما فوق الآخر . ويجرى تشغيل البرج الأسفل تحت ضغط حوالى ٦,١٥ ضغط جوى ، بينما يظل البرج العلوى عند الضغط الجوى المعتاد وفى البرج السفلى يجرى فصل تيار الهواء الداخلى إلى نتروجين نقي تحت ضغط ٥ - ٦ جوى ، وعند ١٧٨°م يسيل النتروجين عند قمة العمود ، ويتجمع هواء غنى يحتوى على ٣٠ - ٤٠ ٪ من الأكسجين عند القاعدة ، ويمر كل تيار بعد مفادرة العمود السفلى خلال صمام تمدد بحيث يزيد ضغطه بالكاد عن الضغط الجوى ، وبذلك يتحقق مزيد من التبريد . ويدخل سائل النتروجين البارد إلى قمة البرج العلوى ليمثل الفيض المكرر . ويدخل الهواء الغنى البارد إلى البرج العلوى ليمثل الفيض المكرر . ويدخل الهواء الغنى البارد إلى البرج عند موضع علوى بعيد ويجرى فصله إلى غاز نتروجين وأكسجين مسال . ويتجمع الأخير عند قاعدة البرج عند درجة حوالى ١٨٣ مئوية ويمكن أن يحمل كمكثف للنتروجين عند قمة البرج السفلى . وعلى الرغم من أن تصميم هذا البرج المزدوج قد يبدو معقداً إلى حد ما ، فهناك عدة عوامل تضافى عليه بساطة نسبية . فالوسائل الناتج يكون نظيفاً إلى حد كبير كما يمكن تصنيع الأرفف من ألواح ذات ثقب بدلاً من الصوانى التى تستخدم عادة فى الصناعات الأخرى . وبالإضافة إلى انخفاض درجة



شكل (٢٥)

برج ليند المزدوج

لزوجة الهواء السائل فإنه يمكن تقريب المسافات نسبياً بين الصواني حتى يصبح البرج أقصر ما يمكن . وبالمقارنة بمشاكل الأبراج العازلة عند مثل هذه الدرجات المنخفضة للحرارة ، فلهذا البرج ميزة واضحة في خفض الفقد الحرارى الداخلى .

وسيتضح فيما بعد أن الهواء المخلوط أعقد بكثير مما افترضته المناقشة السابقة ومن مظاهر تعقیده احتوائه على ١٪ من الأرجون الذى يغلى عند درجة حرارة وسط بين الأكسجين والنروجين . من ناحية أخرى فإن هناك ثمة مشاكل لكنها أقل تأثيراً إذ يحتوى الهواء على بعض الغازات الخاملة الأخرى وستتم مناقشة هذه النقاط فى فصول تالية .

انتقال الحرارة :

تنشأ مشاكل انتقال الحرارة المتعلقة بالوحدات التي تعمل عند درجات الحرارة المنخفضة في اتجاهين . يختص الأول بمسألة استخلاص أقصى قدر من البرودة من المنتجات الخارجة مع نقل البرودة إلى المواد الدافئة نسبياً . ويختص الثاني بالإقلال من فقد البرودة إلى الجو المحيط إلى أقل حد ممكن ، لذلك يراعى عزل الوحدة بأكفاً وسائل العزل الحرارى .

وقد تمت الإشارة في موضع مبكر من هذا الفصل إلى استخدام المسترجعات الحرارية والمبادلات العاكسة في الوحدات الضخمة لإنتاج الغازات تحقيقاً لهدف مزدوج هو إزالة الشوائب وتحقيق تبادل حرارى جيد . ومن المتبع في حالة الوحدات المستخدمة لإنتاج الغازات على نطاق ضيق استخدام طراز من المبادلات يعمل بقاعدة التيار العكسى . وفيه يمر الهواء الداخلى تحت ضغط مرتفع خلال مجموعة من الأنابيب المجمعة على شكل حلزوني حول برج مركزى . ويمر المنتج الخارجى تحت ضغط منخفض عبر السطح الخارجى لهذه الأنابيب في اتجاه عمودى عليها تقريباً .

ومادام العزل الحرارى مستخدماً فمن المتبع احتواء جميع العناصر الباردة للوحدة داخل « صندوق بارد » مملوء بصوف الخبث أو أى طراز من العوازل يعتمد على خامة معدنية ممتدة . وينبغى أن تكون العوازل المستخدمة غير قابلة للاشتعال استيفاءً لشروط الأمن الصناعى . ومن المعروف أن المواد العضوية التي تتشرب الأكسجين يمكن أن تكون متفجرة بدرجة كبيرة .

المواد المستخدمة في الإنشاءات :

يتحول الصلب الطرى إلى مادة قصفة عند درجات حرارة تقل عن حوالى - ٤٠° م . ومن ثم يتعرض للكسر عند حدوث صدمات ميكانيكية .

لذلك يصبح من أساسيات تصميم وحدة من هذه الوحدات التي تعمل عند درجات حرارة منخفضة أن يتم تصنيع المعدات المعرضة لدرجات الحرارة المنخفضة من مادة مثل النحاس أو الألومنيوم أو الصلب الأوستينيتي وهي المواد التي لا تعاني من هذا العيب . ويتوقف الاختيار الدقيق للمادة على متطلبات التصنيع والأسعار .

كفاءة الوحدة :

سبقت الإشارة إلى انخفاض كفاءة وحدات فصل مكونات الهواء بالمقارنة بالطاقة الديناميكية الحرارية المطلوبة . ويرجع هذا النقص في الكفاءة إلى إلى عدد من الأسباب أهمها ما يلي :

- ١ - ابتعاد كباس الهواء ذاته إلى حد كبير عن الانعكاسية الديناميكية وتختلف الكفاءة - تبعاً لتصميم الكباس - باختلاف حجمه والأداء المطلوب منه . ومن النادر أن تزيد الكفاءة في أفضل الأحوال عن ٧٥٪ .
- ٢ - مصاحبة مرحلة التقطير بازدياد في الأنثروبيا (الطاقة غير المستفاد بها في النظام الحراري الديناميكي) .
- ٣ - نتيجة لمرور الغاز خلال المبادلات الحرارية بسرعة كبيرة مع حدوث انخفاض كبير في ضغطه تحدث زيادة في الأنثروبيا .
- ٤ - كما هو الحال مع الكباسات ، فإن أى ماكينة للتمدد تحيد عن شروط الانعكاسية وبالتالي تحدث زيادة في الأنثروبيا .
- ٥ - فقدان نسبة من البرودة في المنتجات الخارجة .
- ٦ - حدوث فيض حرارى إلى داخل الوحدة من الجو المحيط .