المبادئ الأساسية لفصل الهواء

ينص قانون بويل على أنه عند ثبوت درجة الحرارة يتناسب حجم العاز عكسيا مع ضغطه وينص قانون شارل على أنه عند ثبوت الضغط فإن حجم العاز 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 العاز المثالى « الغاز التام » بأنه ذلك العاز الذى ينصاع تماماً لهذه العلاقة .

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

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

* الأنتروبيا : الطاقة التى لا يستفاد بها فى النظام الحرارى الديناميكى .

النتروجين ، وكلا هذين العازين له سلوك الغاز المثـــالى (العاز التام) والافتراض الأول كما رأينا ليس صحيحاً كليـة ولكن الأخير مع ذلك صحيح لدرجة كبيرة . إذ أن الحرارة الناتجة عن خلط الأكسيجين والنتروجين صغيرة لدرجة يمكن معها إهمالها . ولنتخيل احتواء الخليـط فى أسطوانة تحت الضغط الجوى ، ولهذه الأسطوانة غشاءان شبه منفذين ، أحدهما نفيذ (شبه منفذ) للأكسجين والآخر نفيذ للنتروجين ، وعليه يحدث الانتشار حتى يمر جميع النتروجين من خلال أحد الغشاءين ويتجمع عند ضغطه الجزئى والذى يساوى ٧٩ ٪ من الضغط الجوى ، وفى نفس الوقت يتجمع غاز الأكسيجين 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 النتروجين فإن مقدار الشغل الذى يجب بذله = ٠,٧٩ ك : لو $\frac{١}{٠,٧٩}$. وبالنسبة لغاز الأكسجين فإن مقدار الشغل اللازم بذله = ٠,٢١ لو $\frac{١}{٠,٢١}$. كما أن الشغل الكلى الذى يتحتم بذله لإتمام عملية الفصل = مجموع هذين المقدارين .

ويجب الإشارة إلى أن هذا الرقم النظرى لا يعتمد تماماً عـلى الطرق العمليـة المتبعة للفصل . وعملياً ليست هناك عملية يمكن أن تطلق عليها حقيقة أنهـا عكسية . وتكمن العقبة الكئود فى جميع عمليات فصـــل 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 يُوَجّه الجزء الأكبر من العناية فى ترشيد كفاءة العملية إلى الاقتصاد فى استهلاك القدرة وخفضه إلى أقل حد ممكن . ولكن مـع ذلك ، فقد وجد عند بعض المراحل أنه يمكـن تحقيق

الاقتصاد فى استهلاك القدرة فقط على حساب زيادة النفقات فى 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 الاقتصادى الأمثل والذى يجمع بين الميزتين ويقع فى خط وسط بين هذين الحدين .

وتُشَيَّد وحدات فصل الهواء بأنماط مختلفة . لإنتاج واحد أو أكثر من مكوناته ولفصل واحد أو أكثر من المنتجات فى صورة مماثلة ، وأيضاً للحصول على المنتجات بدرجات متفاوتة من النقاوة . وتتوقف الطريقة الدقيقة التى 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 تكنيكية كبرى حتى يمكن المحافظة على فاقد التبريد إلى الحد الأدنى .

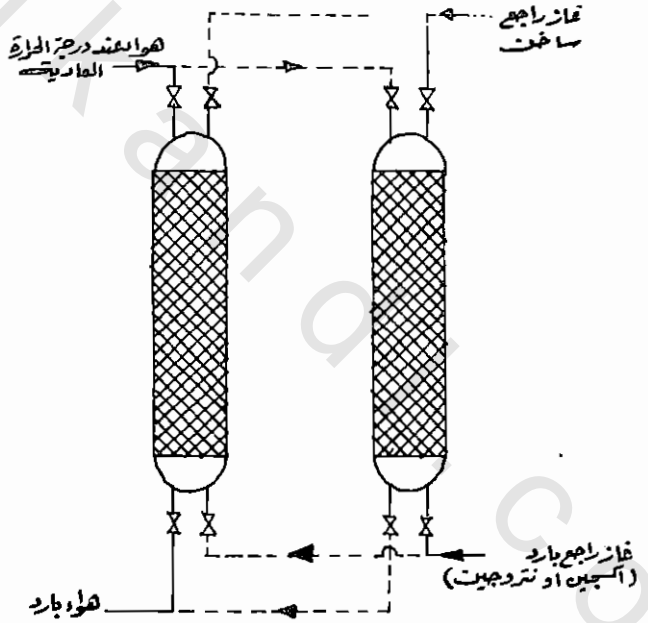
وفيما يلى سنتناول كلا من هذه العوامل لأربعة بالتفصيل .

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 فى درجات حرارة منخفضة . وهناك العديد من الأساليب التى يمكن اتباعها لإجراء عملية التنقية عمليا . وفى الوحدات الغازية الصغيرة وفى وحدات الإسالة التى 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 فى كبس الهواء . وتمتص الرطوبة بصفة عامة بمرورها على

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

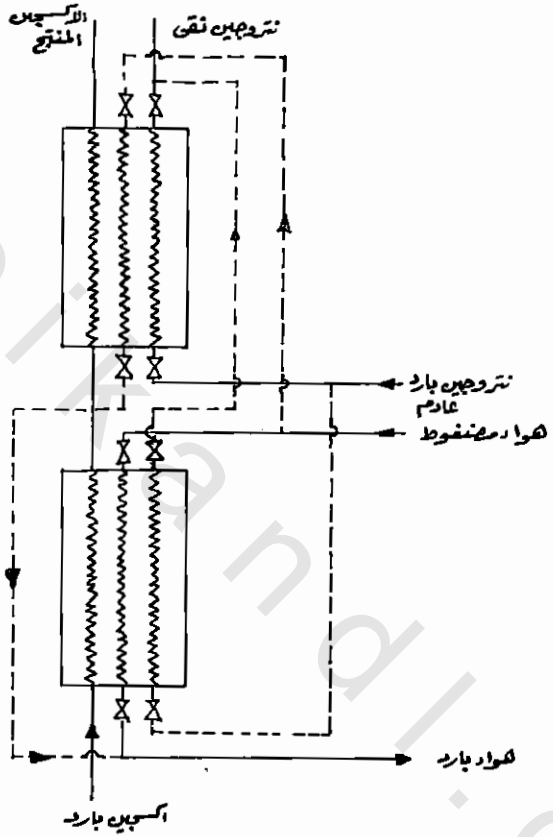
وفى الوحدات الغازية الكبيرة التى تعمل تحت ضغوط منخفضة ، ٦ ضغط جوى على سبيل المثال ، يمكن التأثير على عملية التنقية بواسطة المسترجعات كما فى الشكل (٢١) . ويعتمد تشغيل مثل هذا المبدأ على مرور تيار



شكل (٢١)

يبين مولدات العاز

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



شكل (٢٢)
مبادل حرارى عكسى

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

وتتميز المسترجعات بضخامة 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 فى 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 والنتروجين 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 .

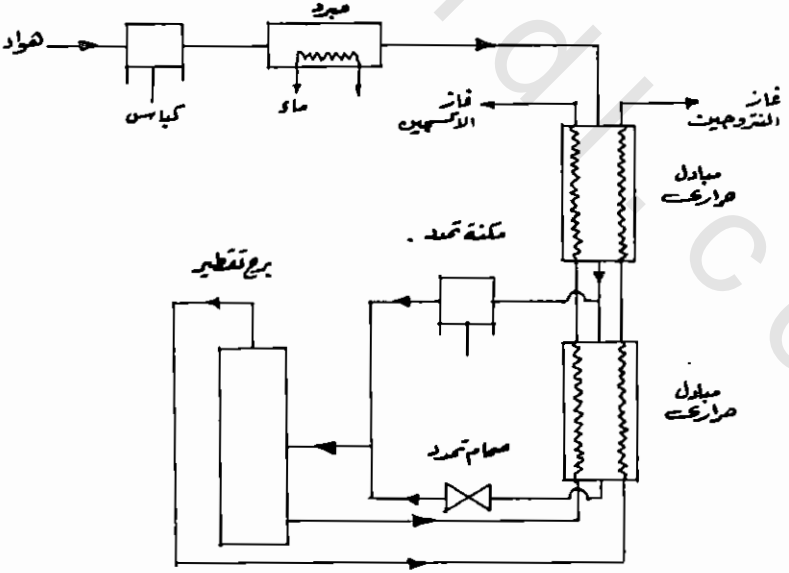
التبريد :

ما إن تتم تنقية الهواء حتى يكون معداً للتبريد وفى النهاية يتحول إلى سائل سواء تم ذلك ببذله شغلا خارجياً فى ماكينة تمدد ، أوباستخدام 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 المنصرفة 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 لدرجة 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



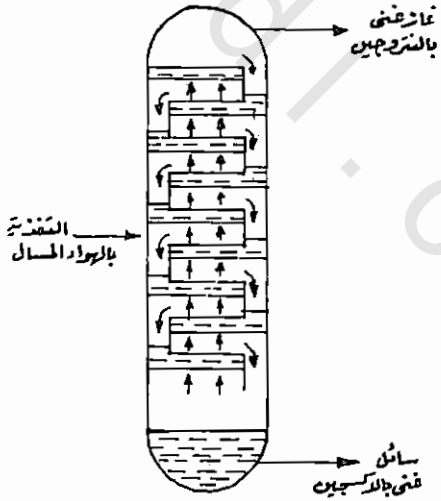
شكل (٢٣)

يوضح دورة إسالة مبسطة

الهواء المنقى إلى ضغط مناسب ثم يعـاد إلى درجة حرارة الغرفة بتبريده بالماء ، وعندئذ يتبادل حرارته مع المنتجات المنصرفة الباردة كما ينتقل جزء من هذه الحرارة إلى آلة تمدد . ويعمل الشغل الذى يفرض أداؤه على تبريدها أكثر . ثم يمر الهـواء المسال جزئياً إلى عمود التكسير . ويمر باقى الهـواء 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 ، والنتروجين 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 بالنتروجين

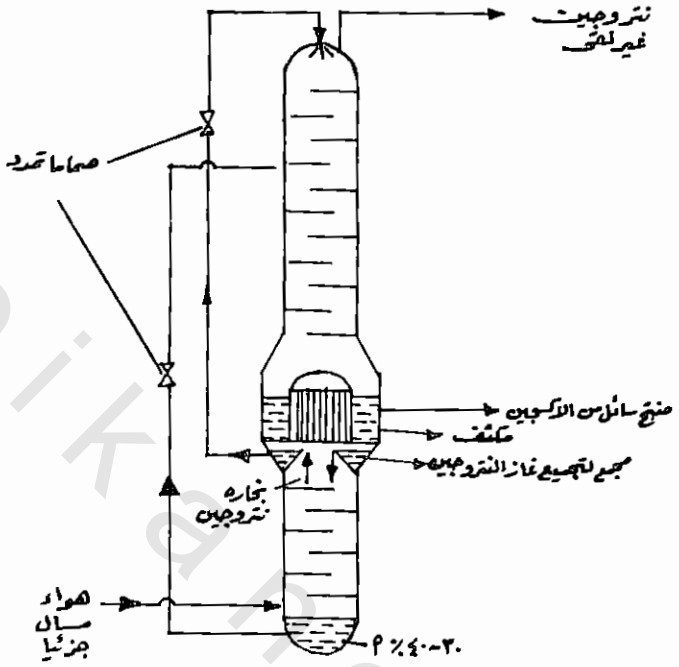


شكل (٢٤)

برج بسيط لتقطير الهـواء

ينصرف عند قمة البرج ، وسائل غنى بالأكسجين يستقر على قاع البرج ومع ذلك فإنه لكى نحصل على منتجات نقية بدرجة معقولة ، فإنه يتحتم الحفاظ على فرق فى درجة الحرارة بين قمة وقاع البرج ، كما يجب توفير التدفق عند القمة بنتروجين سائل بدرجة نقاء معقولة ، ولما كان غاز النتروجين الذى ينصرف من العمود هو أبرد مادة متاحة به ، فإنه يستحيل توفير التدفق المطلوب فى 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 الداخل إلى نتروجين نقى 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 مغادرة 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 تضفى عليه بساطة نسبية . فالسائل الناتج يكون نظيفاً إلى حد كبير كما يمكن تصنيع الأرفف من ألواح ذات ثقوب 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 نسبيًا بين الصوانى حتى يصبح البرج أقصر ما يمكن . وبالمقارنة بمشاكل الأبراج العازلة عند مثل هذه الدرجات المنخفضة للحرارة ، فلهذا البرج ميزة واضحة فى خفض الفيض الحرارى الداخلى .

وسيتضح فيما بعد أن الهواء المخلوط أعقد بكثير مما افترضته المناقشة السابقة ومن مظاهر تعقيده احتواؤه على ١ ٪ من الأرجون الذى يغلى عند درجة حرارة وسط بين الأكسجين والنتروجين . 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 التى تعمل عند درجات الحرارة المنخفضة فى اتجاهين . يختص الأول بمسألة استخلاص أقصى قدر من البرودة من المنتجات الخارجة مع نقل البرودة إلى المواد الدافئة نسبياً . ويختص الثانى بالإقلال من فقد البرودة إلى الجو المحيط إلى أقل حد ممكن ، لذلك يراعى عزل الوحدة بأكفأ وسائل العزل الحرارى .

وقد تمت الإشارة فى موضع مبكر من هذا الفصل إلى استخدام المسترجعات الحرارية والمبادلات العاكسة فى الوحدات الضخمة لإنتاج الغازات تحقيقاً لهدف مزدوج هو إزالة الشوائب وتحقيق تبادل حرارى جيد . ومن المتبع فى حالة الوحدات المستخدمة لإنتاج الغازات على نطاق ضيق استخدام طراز من المبادلات يعمل بقاعدة التيار العكسى . وفيه يمر الهواء الداخل تحت ضغط مرتفع خلال مجموعة من الأنابيب المجمعة على شكل حلزونى حول برج مركزى . ويمر المنتج الخارجى تحت ضغط منخفض عبر السطح الخارجى لهذه الأنابيب فى 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 متمددة . وينبغى أن تكون العوازل المستخدمة غير قابلة للاشتعال استيفاءً لشروط الأمن الصناعى . ومن المعروف أن المواد العضوية التى تتشرب الأكسجين يمكن أن تكون متفجرة بدرجة كبيرة .

المواد المستخدمة فى الإنشاءات :

يتحول الصلب الطرى إلى مادة قصيفة 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 التى تعمل عند درجات حرارة منخفضة أن يتم تصنيع المعدات المعرضة لدرجات الحرارة المنخفضة من مادة مثل النحاس أو الألومنيوم أو الصلب الأوستينيتى وهى المواد التى لا تعانى 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 فى الكفاءة إلى إلى عدد من الأسباب أهمها ما يلى :

١ – ابتعاد كباس الهواء ذاته إلى حد كبير عن الانعكاسية الديناميكنة وتختلف الكفاءة – تبعاً لتصميم الكباس – باختلاف حجمه والأداء المطلوب منه ، ومن النادر أن تزيد الكفاءة فى أفضل الأحوال عن ٧٥ ٪ .

٢ – مصاحبة مرحلة التقطير بازدياد فى الأنتروبيا (الطاقة غير المستفاد بها فى النظام الحرارى الديناميكى) .

٣ – نتيجة لمرور الغاز خلال المبادلات الحرارية بسرعة كبيرة مع حدوث انخفاض كبير فى ضغطه تحدث زيادة فى الأنتروبيا .

٤ – كما هو الحال مع الكباسات ، فإن أى ماكينة للتمدد تحيد عن شروط الانعكاسية وبالتالى تحدث زيادة فى الأنتروبيا .

٥ – فقدان نسبة من البرودة فى المنتجات الخارجة .

٦ – حدوث فيض حرارى إلى داخل الوحدة من الجو المحيط .