



تجفيف الغاز الطبيعي في الآراك

مشروع تخرج أعد لنيل درجة الإجازة في هندسة البترول

إعداد الطلاب

محمد ضحوك العبد الله

إيهاب حسن بركة

إشراف الدكتور

أدمون سلوم

فهرس المحتويات

الصفحة	الموضوع
8	المقدمة
9	الفصل الأول: تركيب الغاز الطبيعي أشكال تواجده والتعبير عنه
10	1-1 تشكله
10	2-1 تركيب الغاز الطبيعي
10	3-1 أشكال تواجد الغاز الطبيعي
12	4-1 العناصر الداخلة في تركيب الغازات الطبيعية حسب حالتها الفيزيائية
12	5-1 التصنيف الصناعي (التجاري) للغازات
14	6-1 كيفية التعبير عن تركيب الغاز
15	7-1 الكتلة الجزيئية الظاهرية
16	الفصل الثاني: الخصائص الفيزيائية والكيميائية والترموديناميكية للغاز الطبيعي
17	مقدمة
17	1-2 البرامترات الحرجة والحرارة الزائفة
19	2-2 البرامترات المخفضة والمخفضة الزائفة
20	3-2 انضغاطية الغاز
21	2 - 4 كثافة الغازات
24	5-2 عامل انحراف الغازات
28	6-2 العامل الحجمي للغازات.
29	2- 7 التوتر السطحي والتوتر بين السطوح:
29	8-2 الانحلالية
30	9-2 رطوبة الغاز
30	10-2 لزوجة الغاز

32	11-2 انفلات الغاز (فعل جول وطومسون)
33	12-2 تشكل الهيدرات (هيدرات الغاز الطبيعي)
33	13-2 الخصائص الكيميائية والترموديناميكية للغازات الطبيعية
33	1-13-2 احتراق الغازات الطبيعية
34	2-13-2 تفكك الغازات الطبيعية
34	3-13-2 الطاقة الحرارية
34	4-13-2 الحرارة النوعية (السعة الحرارية النوعية)
37	5-13-2 الناقلية الحرارية
38	الفصل الثالث: تجفيف الغازات الطبيعية
39	مقدمة
40	1-3 محتوى الرطوبة في الغازات الطبيعية
40	1-1-3 محتوى الرطوبة في الغازات الطبيعية الحلوة
43	2-1-3 محتوى الماء في الغازات الحاوية على H_2S - CO_2
46	3-1-3 محتوى الماء بالغاز في منطقة الهيدرات.
47	4-1-3 طرق تحديد محتوى الرطوبة مخبرياً
47	2-3 إمكانية تشكل الهيدرات في أنظمة الغاز الطبيعي
47	1-2-3 بنية وتركيب الهيدرات
49	2-2-3 شروط تشكل الهيدرات
51	3-2-3 التنبؤ عن شروط تشكل هيدرات الغازات الطبيعية الحلوة
52	4-2-3 التنبؤ عن شروط تشكل هيدرات الغازات الحاوية على غازات حامضية
53	3-3 طرق منع تشكل الهيدرات في أنظمة الغاز الطبيعي
53	1-3-3 موانع تشكل الهيدرات
58	2-3-3 تجفيف الغاز

58	1-2-3-3 التجفيف باستخدام الغليكول
60	2-2-3-3 التجفيف باستخدام المجففات الصلبة
64	الفصل الرابع: التصميم التكنولوجي لوحدة التجفيف
65	مقدمة
65	1-4 تصميم أنظمة تجفيف الغاز الطبيعي باستخدام (TEG)
69	تصميم وحدة تجفيف غاز الأراك
70	الحسابات العملية
72	النتائج والمقترحات
73	المراجع العلمية
74	المصطلحات العلمية

الشكر

من كان ولا يزال معيناً من العلم والمعرفة والعطاء لا يعرف النضوب .. ولا يريد غير
الفيضان ..

وقف أمامنا عمراً كاملاً من التعب والجهد والمثابرة والطموح.. و وقف معنا يداً
ممدودةً تريد أن تأخذ بنا إلى النجوم حيث يريد شغف روحه..

أراد أن يسابق الزمن حتى يحقق مراده .. فسبق زمنه واستمر في المضي حتى يقف
عند حدود السماء..

لا أتكلم عن شخص في هذا العالم فحسب.. بل أتكلم عن عالمٍ سكن في شخصه..
عن طموح حقق نفسه ، وأراد لمن حوله كذلك .. فكان له ما يريد، بحبه وتواضعه
وكرمه وعطائه اللامحدود..

لا تسعني الكلمات أن أشكر من كان في كل يوم دليلي وقدوتي وأستاذي..
أسأل الله أن يعطيك من العمر خيره.. ومن الحياة كرمها.. ومن العطاء بركته.. ومن
الفضل ما تستحقه يداك الفاضلتان الكريمتان....

إلى أستاذي ومعلمي وقدوتي الدكتور آدمون سلوم

الإهداء

إلى من سكنت في قلوبنا قبل أن نسكنها

نسأل الله أن تزول جراحك ويزهر ياسمينك من جديد

سورييني

إلى القلب الكبير الذي لا يتعب

إلى من أعطى فأخلص

إلى حنان العالم المحصور بين زندين

إلى عماد بيتنا ومثلنا الأعلى

إلى الرجل الأول الذي كان وسيبقى بجاني

إلى من منه اتمائي ، عزتي ، شموخي

فخري وقدوتي ... أبي

إلى من نذرت عمرها في أداء رسالة تعلم العطاء كيف يكون العطاء، إليك أمي

أهدي هذه الرسالة وشتان بين رسالة ورسالة.....

إلى أصابع اليد الممدودة بلا ملل وفي عطاء غير محدود.....

إلى جنة الحياة، سر وجودي، ملاكي الطاهر.....

إلى من هي في الحياة حياة.

قرة عيني وطريقي إلى الجنة... أمي

إهداء نابع من القلب للقلب.....

إلى من قضيت معهم احلى أيامي وأوقاتي.....

إلى من شاركوني أفراحي.....

وقاسموني أحزاني.....

أصدقائي

مقدمة

لقد تزايد الاهتمام بالغاز الطبيعي خلال السنوات الماضية واخذ يحتل مكاناً مميزاً على مستوى العالم كأحد مصادر الطاقة النظيفة. وذلك يرجع إلى الوعي العالمي بخصوص تلوث البيئة، والعواقب المترتبة على صحة الإنسان، إضافة إلى تواجد احتياطات كبيرة من الغاز الطبيعي في هذه الدول يجب استغلالها، إضافة إلى تمتعه بتركيب كيميائي بسيط وذو احتراق سهل ونظيف واستخدامه الواسع في مجال الصناعة البتروكيميائية كما وإن الغاز الطبيعي يتطلب معالجة سهلة وبسيطة قبل الاستخدام مقارنة مع مصادر الطاقة الأخرى.

هذا وإن الغاز الطبيعي يحتوي بالإضافة للمركبات الهيدروكربونية على بعض الشوائب الميكانيكية والغازات غير الهيدروكربونية مثل ($CO_2 - H_2S$)، والتي تسبب العديد من المشاكل أثناء عمليات المعالجة وتسيء إلى مواصفات الغاز.

ومن أجل الاستخدام الآمن والصحي والاستفادة الكاملة من الطاقة الحرارية للغاز الطبيعي يجب تخليص تيار الغاز الطبيعي من هذه الملوثات.

كما تحتوي الغازات الطبيعية عملياً في الشروط النظامية على كميات محددة من بخار الماء تتراوح بين ($4g/m_n^3 \div 20g/m_n^3$) بالإضافة إلى كميات الناتجة عن عمليات المعالجة السابقة (التحلية) ، وهذه الكميات من بخار الماء تعتبر من أصعب المشاكل التي تصادف أثناء إنتاج الغاز وأثناء عمليات المعالجة اللاحقة بسبب تشكل الهيدرات. من هنا أتت أهمية الإحاطة بعمليات تجفيف وتخليص التيار الغازي من آثار بخار الماء وذلك باستخدام مجموعة من التقنيات إما باستخدام المجففات الصلبة (Solid Desiccants) أو المجففات السائلة (Desiccants Liquid).

قمنا في هذا البحث بدراسة موضوع التجفيف على الغاز المعالج في محطة الأراك وذلك باستخدام مادة (TEG) (ثلاثي إيثيلين الغليكول) كما تناولنا في هذا البحث الأمور التصميمية لوحدة التجفيف والتي تهدف بشكل رئيسي إلى تحديد أبعاد برج التجفيف المستخدم في المحطة (طول - قطر - عدد صواني).

ونرجو من الله أن نكون قد وفقنا في إنجاز هذا العمل بما يخدم بلدنا وإخواننا من المهندسين العاملين في مجال الغاز.

الفصل الأول
تركيب الغاز الطبيعي
أشكال تواجده وكيفية التعبير عنه

الغاز الطبيعي (Natural gas)

1-1 تشكله:

يتشكل الغاز الطبيعي من العوالق (plankton) وهي كائنات مجهرية تتضمن الطحالب والكائنات الأولية التي ماتت وتراكمت في طبقات الأرض والمحيطات ثم انضغطت تحت الطبقات الرسوبية لتحويل هذه المواد العضوية إلى غاز طبيعي .

يتشابه الغاز الطبيعي مع البترول من حيث الظروف الطبيعية التي تشكلها فيها ، إلا أن البترول يتشكل عند اعماق تزيد عن (1000- 6000) متر، وعند درجات حرارة حوالي (60 - 150) درجة مئوية. بينما الغاز الطبيعي يتشكل عند مناطق أعمق ودرجات أعلى.

2-1 تركيب الغاز الطبيعي :

الغاز الطبيعي بالتعريف هو مزيج من مركبات هيدروكربونية خفيفة ، يوجد بالحالة الغازية عند الشروط النظامية من الضغط والحرارة .

يتكون الغاز الطبيعي من نسبة عالية من غاز الميثان CH_4 حيث تصل نسبته إلى أكثر من (85%) ، كما يحوي على كميات مختلفة من الإيثان والبروبان والبوتان ومركبات أثقل والتي قد تصل نسبتها إلى حوالي (30%) من حجم الغاز الطبيعي .

يمكن للغاز الطبيعي أن يحوي على نسب ضئيلة من الغازات الحامضية

أمثال (H_2S-CO_2) أو غاز الآزوت (N_2) وأحياناً غاز الهليوم .

3-1 أشكال تواجد الغاز الطبيعي:

(1) الغاز الحر (Non Associated Gas):

هو غاز ينتج من آبار الغاز العميقة وبصورة مستقلة عن إنتاج النفط الخام . وهو عبارة عن مركبات هيدروكربونية توجد بشكل غازات حرة في الشروط الابتدائية للمكمن ، وتتألف بشكل أساسي من الميثان الذي تزيد نسبته في الغاز الحر عن (98%) مع وجود نسب ضئيلة من المركبات الهيدروكربونية الأثقل وبعض الغازات غير الهيدروكربونية

أمثال : ($N_2 - CO_2 - H_2S$) .

وتقسم الغازات الحرة بدورها إلى نوعين :

جافة: وتتألف بشكل رئيسي من الميثان مع كميات قليلة من الإيثان

رطوبة : حيث تحتوي على كميات كبيرة من الفحوم الهيدروجينية الأثقل من الميثان . انظر إلى الجدول (1-1)

تركيب الغاز الرطب (mole %)	تركيب الغاز الجاف (mole %)	اسم العنصر
50-92	70-98	الميثان
5-15	1-10	الإيثان
2-14	Traces-5	البروبان
1-10	Traces-2	البوتان
Traces-5	Traces-1	البنتان
Traces-3	Traces-0.5	الهيكسان
Traces-15	0-Traces	الهيبتان+
Traces-10	Traces-15	الآزوت
Traces-4	Traces-1	ثنائي أكسيد الكربون
0-6	0-Traces	كبريت الهيدروجين
0	0-5	الهيليوم

الجدول (1-1) تركيب الغازات الجافة والرطوبة

(2) الغاز المرافق (Associated Gas) :

وهو غاز يصاحب النفط الخام في مكانه وينتج معه وتتوقف معدلات إنتاجه على معدلات إنتاج النفط الخام ، ويقسم الغاز المرافق على قسمين هما:

أ- غازات القبة الغازية (Gas – Cap Gas)

وهي تتواجد في مكامن النفط بشكل قبة فوق سطح النفط وتعرف بما يسمى غطاء الغاز، والذي يتكون من مركبات هيدروكربونية ($C_1 \dots \dots C_6$) تتواجد بشكل غازات حرة في الشروط الابتدائية .

ب- غازات منحلة (Desolved Gas):

تكون في الشروط الابتدائية منحلة في النفط وتتكون بشكل رئيسي من هيدروكربونات براهينية هي الميثان ، الإيثان ، البروبان ، مركبات أثقل .

لكن نتيجة انخفاض الضغط عن ضغط الإشباع لدى استخراج النفط إلى السطح يحدث انفصال لهذا الغاز عن النفط وحسب شروط انفصاله عن النفط والتركيب الكيميائي للنفط تتحدد مواصفات هذا الغاز .

1-4 العناصر الداخلة في تركيب الغازات الطبيعية حسب حالتها الفيزيائية :

(1) الميثان (CH_4) - الإيثان (C_2H_6) - الأثلن (C_2H_4) وهي عبارة عن غازات حقيقية في الشروط الطبيعية .

(2) البروبان (C_3H_8) - البروبيلن (C_3H_6) - البوتلين (C_4H_8) - الأيزوبوتان ($i-C_4H_{12}$) - البوتان النظامي ($n-C_4H_{12}$) .

كل هذه المركبات تتواجد بشكل أبخرة في الشروط النظامية وتنسيل (تنميع) عند ارتفاع الضغط ، لذلك يطلق عليها اسم الغازات البترولية المسيلة .

المركبات الهيدروكربونية الأثقل من البوتان ($C_5 +$) تتواجد بحالة سائلة في الشروط النظامية.

1-5 التصنيف الصناعي (التجاري) للغازات :

من وجهة النظر الصناعية و التجارية يمكن تمييز بعض مصطلحات التالية :

(1) الغازات الخاملة (Inert Gas)

هي غازات خاملة كيميائياً أي لا تتفاعل مع الوسط المحيط وهي بحالة استقرار كيميائي و أهمها غاز الأزوت الهليوم والتي يمكن أن تتواجد في تركيب الغاز الطبيعي .

2) الغازات الحامضية (Acide Gas) :

و هي غازات ذات أسس حامضية والتي بتفاعلها مع الماء يمكن أن تعطي أحماضاً . مثل غاز ثاني أكسد الكربون (CO₂) وغاز كبريت الهيدروجين (H₂S) .

3) سوائل الغاز الطبيعي (Natural Gas Liquids) :

هي عبارة عن مركبات هيدروكربونية منزوعة على السطح في وحدات المعالجة و تتألف من الإيثان – البروبان- البوتان – البنتان والغازولين الطبيعي .يمكن تحويلها إلى بنزين سيارات عن طريق عمليات التكسير الحراري .ويطلق عليها اختصاراً (NGL).

4) الغازات الطبيعية المسالة (Liquefied Natural Gas) :

هي مركبات هيدروكربونية يمكن أن تتميع و تتحول إلى سائل ، ويشكل الميثان النسبة العظمى فيها ، ويرمز لها اختصاراً (LNG) .

5) الغازات النفطية المسالة (Liquefied petroleum Gas) :

و تتكون بشكل أساسي من البروبان بنسبة تتراوح بين (25.....0%) ومن البوتان بنسبة تتراوح ما بين (100.....75) % . وفيها تحافظ الغازات على طورها السائل تحت ضغط معين في أوعية مغلقة . ويرمز لها اختصاراً (LPG) .

6) الغازولين الطبيعي (Natural Gasoline) :

وهو بشكل أساسي مكون من مزيج من البنتان و مركبات هيدروكربونية أثقل و متطايرة ، يتم الحصول عليه من عمليات التكسير و التهذيب و الالكلة حيث تتكاثف مكوناته ضمن مجال من الحرارة ما بين (175.....35) درجة مئوية .

7) المكثفات (الكوندنسات) (Condensate) :

عبارة عن مركبات هيدروكربونية تتشكل نتيجة تغير شروط الضغط و الحرارة عند عبور تيار الغاز من الطبقة إلى الوحدات السطحية .

6-1 كيفية التعبير عن تركيب الغاز :

يدرس عادةً وضع الغاز الطبيعي على أنه مزيج من الغازات و ليس كمركب واحد منفرد ، لذلك يعبر عنه بعدة طرق هي :

(1) النسبة المئوية الوزنية:

تعيين نسبة علاقة كتلة المركبة الواحدة من الغاز إلى مجموع كتل العناصر المكونة للمزيج وتضرب بالعدد (100) وبالتالي المركبات ذات العدد (i) والكتلة (m_i) سوف تعطي نسبتها الوزنية بالعلاقة :

$$g_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \times 100 = \% \quad (1.1)$$

(2) النسبة الحجمية :

تمثل نسبة حجم عدد (i) من المركبات الغازية إلى مجموع حجم كل المركبات المكونة للمزيج وتعطى بالعلاقة :

$$r_i = \frac{v_i}{\sum v_i} \times 100 = \% \quad (1.2)$$

(3) النسبة المولية :

هي نسبة عدد مولات المكون الغازي في حجم معين إلى مجموع عدد المولات الكلي في المزيج الغازي في نفس الحجم وتعطى بالعلاقة التالية:

$$y_i = \frac{n_i}{\sum n_i} \times 100 = \% \quad (1.3)$$

ويطلق عليها عادة مصطلح الكسر المولي :

$$y_i = \frac{n_i}{\sum n_i} \quad (1.4)$$

7-1 الكتلة الجزيئية الظاهرية :

يأخذ المزيج الغازي شكلاً وكأن له وزناً جزيئياً معيناً بمقدار (22.414) لتر من المزيج الغازي عند درجة الحرارة صفر مئوية والضغط (760 ملم زئبقي) يطلق عليه اسم الوزن الجزيئي الظاهري للمزيج الغازي .

فإذا كان (y_i) الكسر المولي لعدد من المركبات في المزيج الغازي عندها يعبر عن الكتلة المولية الظاهرية كالتالي :

$$AMW = \sum Y_i \times MW_i \quad (1.5)$$



الفصل الثاني

الخصائص الفيزيائية والكيميائية
والترموديناميكية للغازات الطبيعية

الخصائص الفيزيائية والكيميائية والترموديناميكية للغازات الطبيعية

-مقدمة:

تمثل معرفة سلوكية و تركيب الغازات الطبيعية وبالتالي معرفة خصائصها الفيزيو- كيميائية و الترموديناميكية الخطوة الرئيسية الأولى في كل العمليات الضرورية والهامة في الصناعة الغازية ابتداءً من عمليات تصميم أجهزة قعر البئر الغازي مروراً بعمليات إنتاج الغاز و معالجته و تصميم أنابيب نقله و انتهاءً بعمليات تصميم أنظمة توزيعه إلى المستهلكين .

تتمتع العناصر الغازية المؤلفة للغازات الطبيعية بخصائص فيزيائية مختلفة و متغيرة فيما بينها ضمن مجالات واسعة جداً ، وهذا ما يفسر السلوكية المختلفة لهذه العناصر في معظم عمليات الصناعة الغازية مقارنة مع سلوكية الغاز المثالي ، لذلك من المهم جداً معرفة هذه الخصائص عند تصميم و تنفيذ عمليات الصناعة الغازية المختلفة. ويمكن أن نذكر من أهم هذه الخصائص :

2-1 البارامترات الحرجة و الحرجة الزائفة :

تمثل معرفة البارامترات الحرجة (لاحظ الجدول (2,1)) و الحرجة الزائفة أهمية صناعية كبرى وذلك عند تعيين الحالة الفيزيائية للمزيج الغازي ، كما أنها تستخدم في تعيين قيمة عامل الانضغاطية (Z) .

وتمثل البارامترات الحرجة ما يلي :

- **درجة الحرارة الحرجة :** ويرمز لها ب (T_C) : وهي بالتعريف درجة الحرارة التي فوقها لا يمكن للغاز ان يتميع ، فمثلاً درجة الحرارة الحرجة للإيثان ($T_C = 32.2 C$) .
 - **الضغط الحرج :** ويرمز له ب (P_C) : وهو عبارة عن القيمة الدنيا للضغط الذي يمكن للغاز عنده أن يتميع فيما لو كانت درجة حرارته موافقة لدرجة الحرارة الحرجة T_C .
- فالضغط الحرج للإيثان ($P_C = 48.16 atm$) وهذا يعني انه عند ضغط أعلى من ($48.16 atm$) ودرجة حرارة أعلى من ($32.2C^o$) لا يمكن للإيثان أن يتميع .

الجدول (2,1) يبين بعض البارامترات الحرجة لبعض عناصر المزيج الغازي .

V_{Ci} m^3/kg	T_{Ci} (K)	P_{Ci} (Bar)	الصيغة الكيميائية	اسم العنصر
0.00318	126.16	33.93	N_2	الآزوت
0.00214	304.20	73.83	CO_2	ثاني أكسيد الكربون
0.00190	430.66	78.85	SO_2	ثاني أكسيد الكبريت
0.00284	373.56	89.63	H_2S	كبريت الهيدروجين
0.00617	190.66	46.40	CH_4	الميثان
0.00488	305.43	48.62	C_2H_6	الإيثان
0.00453	370.00	42.65	C_3H_8	البروبان
0.00445	408.14	36.47	$i-C_4H_{10}$	ايزو البوتان
0.00438	425.17	37.96	$n-C_4H_{10}$	نظامي البوتان
0.00423	460.96	33.33	$i-C_5H_{12}$	ايزو البنتان
0.00421	469.78	33.74	$n-C_5H_{12}$	نظامي البنتان
	498.06	30.34	$i-C_6H_{14}$	ايزو الهكسان
	507.86	30.31	$n-C_6H_{14}$	نظامي الهكسان
	540.17	27.36	$n-C_7H_{16}$	نظامي الهبتان

الجدول (2,1) البارامترات الحرجة لبعض عناصر المزيج الغازي

ويجب الإشارة أنه عند التعامل مع المزائج الغازية يتم استخدام البارامترات الحرجة الزائفة (Pseudo-critical) بدلاً من البارامترات الحرجة . إذ يمكن تعيين البارامترات الحرجة الزائفة للمزيج الغازي باستخدام العلاقات التالية:

(2.1)

$$P_{pc} = \sum_{i=1}^N Y_i P_{ci} \quad , \quad T_{pc} = \sum_{i=1}^N y_i T_{ci}$$

ولكن عندما يتعذر علينا معرفة تركيب المزيج الغازي يمكن تعيين البارامترات الحرجة للمزيج الغازي بالاستعانة بالعلاقات (A.Z.Istomin) التالية :

$$P_{pc} = (4,937 - 0,64 \cdot \Delta) \cdot 10^6 \quad , \quad T_{pc} = 171,5 \cdot \Delta + 97 \quad (2.2)$$

حيث أن Δ : الكثافة النسبية للغاز .

2-2 البارامترات المخفضة والمخفضة الزائفة :

يمكن التعويض عن البارامترات الأساسية (P , V , T) والتي تصف حالة غاز ما بالنسبة بين القيم المطلقة والقيم الحرجة لكل بارامتر من البارامترات المذكورة أعلاه ، عندئذ يمكن أن نحصل من أجل هذا الغاز المدروس على بعض القيم المسماة بالبارامترات المخفضة كما يلي :

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad , \quad T_r = \frac{T}{T_c} \quad , \quad V_r = \frac{V}{V_c} \quad (2.3)$$

وبناءً عليه يكون لجميع الغازات نفس معادلة الحالة عندما يتم التعبير عنها من خلال بارامتراتها المخفضة أي :

$$f(P_r, T_r, V_r) = 0 \quad (2.4)$$

وتعرف هذه المعادلة بمعادلة الحالات المتناظرة ولكن نظراً للأخطاء التي تعطيها هذه النظرية فقد تم اعتبارها نظرية تقريبية ذات دقة كافية نسبياً وذلك من الغازات ذات التراكيب الكيميائية المتقاربة .

أما بالنسبة للمزائج الغازية يتم الاستعاضة عن البارامترات المخفضة بالبارامترات المخفضة الزائفة والمعرفة كما يلي :

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}} \quad , \quad T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} \quad (2.5)$$

3-2 انضغاطية الغاز :Gas compressibility

انضغاطية الغاز (Cg) هي عامل تمدده عند درجة حرارة ثابتة ، يجب عدم الخلط بين (Cg) انضغاطية الغاز وبين (Z) عامل الانضغاط الذي يعبر عن انحراف الغازات عن سلوكها المثالي

بمقارنة انضغاطية الغاز مع انضغاطية الموائع الأخرى وانضغاطية الصخر نجد أنها أكبر بكثير وتتراوح من :

(1000 psi) عند الضغط (100×10⁻⁶psi⁻¹)

وحتى تقريباً: (200×10⁻⁶psi⁻¹) عند الضغط (5000 psi)

تحدد انضغاطية الغاز Cg من العلاقة:

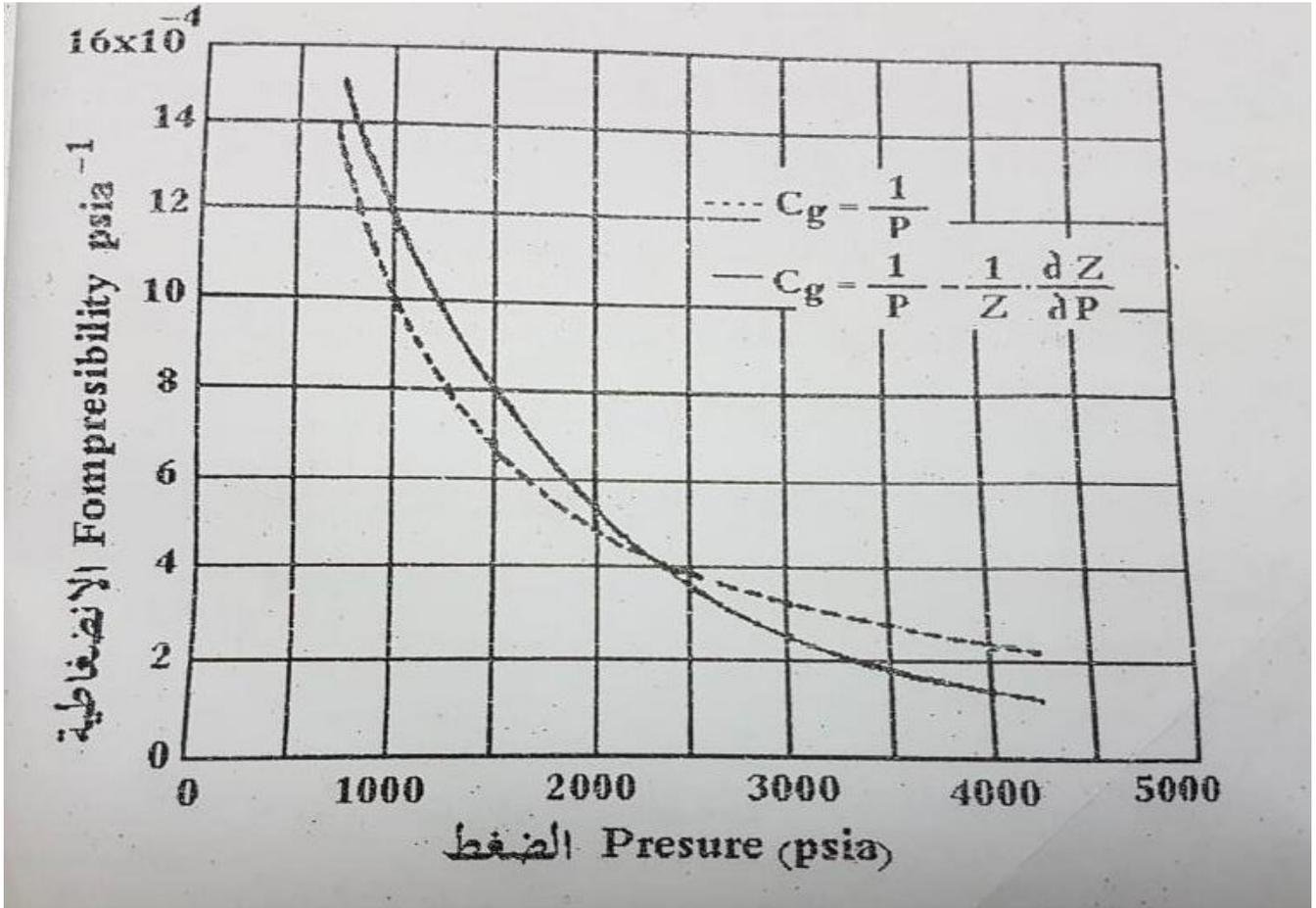
$$Cg = \frac{-1}{V} \times \frac{\partial V}{\partial P} \quad (2-6)$$

V: حجم الغاز

$\frac{-\partial V}{\partial P}$: تغير الحجم مع تغير الضغط

$$Cg = \frac{1}{P} \quad (2-7) \quad \text{حقلياً يتم استخدام العلاقة}$$

عند رسم العلاقتين (2-6) و (2-7) الشكل رقم (2-1) ، على سبيل المثال كثافة النسبية (γ= 0.86) ودرجة الحرارة (T=200F) نلاحظ تبايناً واضحاً في قيم (Cg) باستثناء القيم القريبة من نقطة تقاطع المنحنيين ، الشكل رقم (4-2) والتي تتراوح فيها قيم الضغط من (2000-2750) (psi) حيث يكون تغير قيم العامل Z قليلة مع الضغط .



الشكل (2,1)

4-2- كثافة الغازات Gas Density:

كثافة المادة بالتعريف هي النسبة بين المادة في حالة السكون إلى حجمها .

تقاس الكثافة في الجملة الدولية (Si) بالكيلو غرام على المتر المكعب kg/m³ أما في الوحدات الانكليزية تقاس ب (lb/ft³)

في الشروط النظامية يمكن تحديد كثافة الغاز (ρ_g) بمعرفة كتلتها الجزيئية (M) من العلاقة التالية:

$$\rho_o = \frac{M}{22.41} \quad (2.8)$$

إذا كانت كثافة الغاز (ρ_o) عند الشرطين النظاميين معلومة يمكن تحديد الكثافة (ρ) عند تغير الضغط وثبات درجة الحرارة من العلاقة التالية:

$$y = \frac{\rho_o \times \rho}{0.1013} \quad (2.9) \quad \text{حيث أن}$$

P الضغط ب ميغا باسكال (Map)

يحسب الوزن النوعي للغاز Δ بالاعتماد على الكثافة من العلاقة التالية:

$$\Delta = \rho \times g \quad (2.10)$$

تحسب الكثافة النسبية للغاز من العلاقة

$$y = \frac{P_0}{1.293} \quad (2.11)$$

توصف المزائج الغازية بتراكيز المركبات الوزنية والمولية فيها ومن المعروف أن التركيب الحجمي للمزيج الغازي لوصف المزيج الغازي يتطابق مع التركيب المولي يجب معرفة كتلته الجزيئية الوسطية وكثافته الوسطية أو الكثافة النسبية للهواء.

أ - يتم حساب الكتلة الجزيئية الظاهرية للمزيج (M_{mix}) عند معرفة : التركيب المولي للمزيج من العلاقة التالية :

$$M_{max} = \frac{(y_1 \times M_1) + (y_2 \times M_2) + \dots + (y_n \times M_n)}{100} \quad (2-12)$$

حيث أن:

y_1, y_2, \dots, y_n التراكيز المولية للمركبات $(1, 2, \dots, n)\%$

M_1, M_2, \dots, M_n الكتل الجزيئية للمركبات $(1, 2, \dots, n)$

التركيب الوزني للمزيج من العلاقة التالية:

$$M_{max} = \frac{100}{\left[\frac{g_1}{M_1} + \frac{g_2}{M_2} + \dots \right]} \quad (2-13)$$

حيث أن التراكيز g_1, g_2 الوزنية للمركبات

أ- تتحدد كثافة المزيج (ρ_{mix}) باستخدام وزنه الجزيئي الظاهري

$$\rho_{mix} = \frac{M_{mix}}{22.41} \quad (2-14) \quad \text{عند الشروط النظامية}$$

$$\rho_{max} = \frac{M_{max}}{24.05} \quad (2-15) \quad \text{عند الشروط القياسية}$$

تتحدد الكثافة النسبية للمزيج y :

$$y = \frac{\rho_{max}}{1.293} \quad (2-16) \quad \text{عند الشروط النظامية}$$

$$y = \frac{\rho_{max}}{1.205} \quad (2-17) \quad \text{عند الشروط القياسية}$$

د- يحتوي الغاز الطبيعي عادةً على ثلاث قطفات (بروبانية، بوتانية، بنزين غازي) لذا لا بد لمعرفة مواصفاته معرفة تامة من معرفة محتواه من الهيدروكربونات الثقيلة، يمكن حساب كمية الهيدروكربونات الثقيلة ب (g_r/m^3) من العلاقة التالية:

$$A=10 \times g_r \times \rho_{max} = 10 \times X \times \rho \quad (2-18)$$

حيث أن:

g_r المحتوى الوزني للمركب الثقيل في الغاز %

ρ_{max} الكثافة الظاهرية للغاز الطبيعي kg/m^3

X : المحتوى المولي للمركب الثقيل في الغاز %

ρ كثافة المركب الثقيل (Kg/ m^3)

يمكن حساب الكثافة الوسطية للمزيج السائلي من العلاقة التالية:

$$\rho_{max} = \frac{100}{\left[\frac{g_1}{\rho_1} + \frac{g_2}{\rho_2} + \dots\right]} = 100 \times \frac{100}{\left[\frac{x_1 \times M_1}{\rho_1} + \frac{x_2 \times M_2}{\rho_2}\right]} \quad (2 - 19)$$

حيث أن :

ρ_1, ρ_2 : كثافة مركبات المزيج السائلي. (kg/m^3)

x_1, x_2 : المحتوى المولي لمركبات المزيج السائلي.

اسم العنصر	الصيغة الكيميائية		
الأزوت	N_2	28.016	1.250
ثنائي أكسيد الكربون	CO_2	44.011	1.965
الهيدروجين	H_2	2.016	0.090
كبريت الهيدروجين	H_2S	34.076	1.521
الأوكسجين	O_2	32.000	1.429
الميثان	CH_4	16.042	0.716

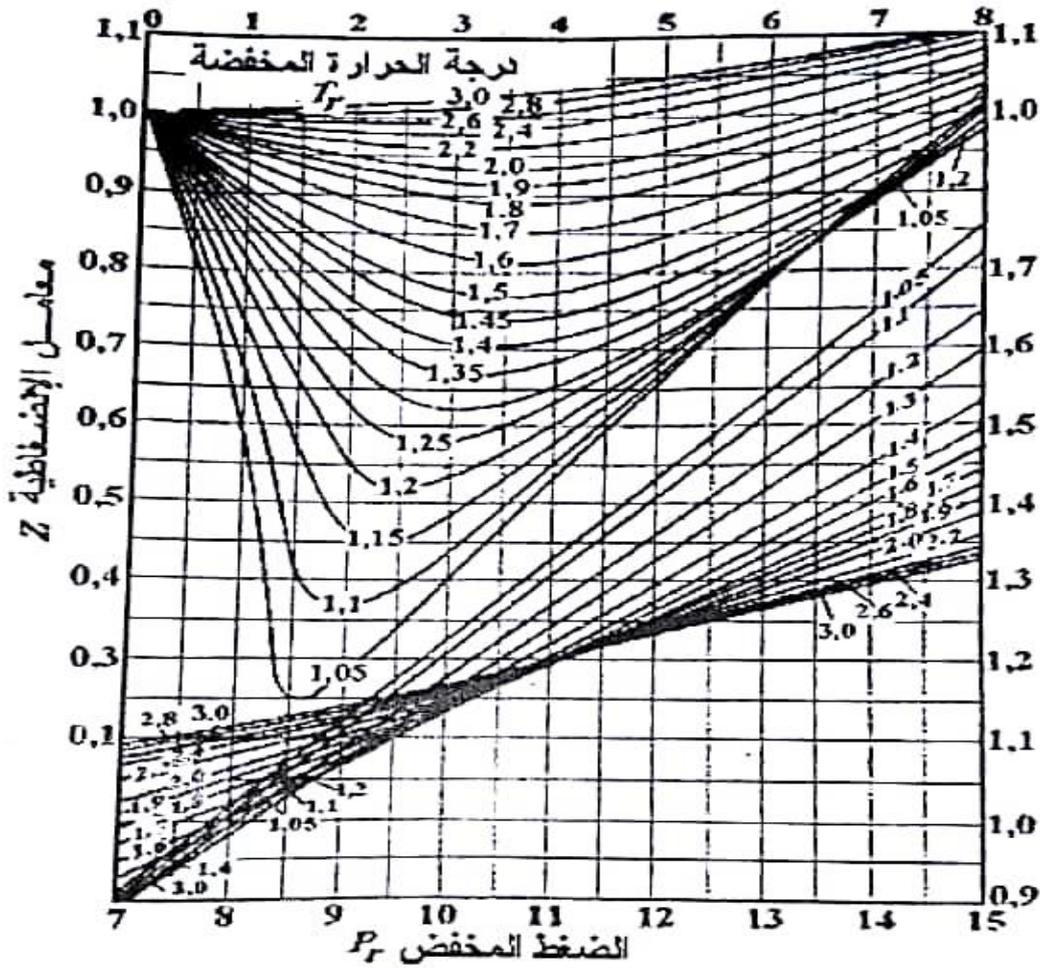
1.342	30.068	C_2H_6	الإيثان
1.968	44.094	C_3H_8	البروبان
2.595	58.12	$i-C_4H_{10}$	أيزو البوتان
2.595	58.12	$n-C_4H_{10}$	نظامي البوتان
3.220	72.146	$i-C_5H_{12}$	أيزو البنتان
3.220	72.146	$n-C_5H_{12}$	نظامي البنتان
3.847	86.172	$i-C_6H_{14}$	أيزو الهكسان
3.847	86.172	$n-C_6H_{14}$	نظامي الهكسان
4.473	100.198	$n-C_7H_{16}$	نظامي الهيبنتان

الجدول (2-2) الكتلة المولية والكثافة النظامية لبعض العناصر الغازية

2-5 عامل انحراف الغازات (Z-factor)

يمثل هذا العامل انحراف سلوك الغازات الحقيقية عن سلوك الغازات المثالية بالعلاقة مع شروط الضغط ودرجة الحرارة . ويمكن تحديده كتابع للضغط المنخفض ودرجة الحرارة المنخفضة (ضغط مصغر P_r _ درجة حرارة مصغرة T_r) وذلك من خلال منحنيات كاتس _ براون (standing Katz) الشكل (2,2)

وتجدر الإشارة بأن قيمة هذا العمل من أجل الغازات المثالية هي $Z=1$.



الشكل (2.2) standing katz

عامل الانضغاطية Z بالعلاقة مع الضغط ودرجة الحرارة المخفضين

2-5-1 طريقة تعيين عامل الانضغاطية Z باستخدام العلاقات الرياضية :

في الحقيقة تفتقر قيمة عامل الانضغاطية المقروءة من المنحنيات البيانية إلى الدقة الكافية ، و لهذا السبب تم اعتماد مجموعة من العلاقات الرياضية التجريبية ذات الشكل

$$Z = f(\rho_{pr} , T_{pr}) \quad \text{ويمكن أن نذكر منها :}$$

1. علاقة Berthelot :

$$Z = 1 + \frac{9}{128} \cdot \frac{\rho}{\rho_{pc}} \cdot \frac{T_{pc}}{T} \left(1 - \frac{6T_{pc}^2}{T^2} \right) \quad (2-20)$$

وبمراعاة قيمة الضغط المخفض الزائف و درجة الحرارة المخفضة الزائفة ، يمكن كتابة العلاقة السابقة على النحو التالي:

$$Z = 1 + \frac{9}{128} \cdot \frac{P_{pr}}{T_{pc}} \cdot \left(1 - \frac{6}{T_{pr}^2}\right) \quad (2-21)$$

علاقة Adamov :

$$Z = \frac{1}{1 + (24 - 0,27 \cdot T) \cdot 10^{-4} \cdot P} \quad (2.22)$$

حيث أن : T : درجة حرارة الغاز (°C)

P : ضغط الغاز (Bar)

2-5-2 تأثير المركبات غير الهيدروكربونية على عامل الانضغاطية :

من المعلوم أن الغازات الطبيعية تحتوي بالإضافة للمركبات الهيدروكربونية ، مركبات غير هيدروكربونية كالأزوت ، و ثنائي أكسيد الكربون ، وغاز كبريت الهيدروجين ، لكن عندما تتجاوز قيمة الكسر المولي لأحد هذه الغازات أو مجموعهما (10%) فمن المستحسن عدم اللجوء إلى استخدام العلاقات الرياضية السابقة في تعيين قيمة عامل الانضغاطية لأنها يمكن أن تؤدي إلى أخطاء كبيرة لا يسمح بها في الصيغة الغازية .

لقد قام العالمان (wichert and aziz) بتعريف كل من الضغط الحرج الزائف المصحح و درجة الحرارة الحرجة الزائفة المصححة كما يلي :

$$\hat{T}_{pc} = T_{pc} - \varepsilon \quad (2.23)$$

$$\hat{P}_{pc} = \frac{P_{pc} \cdot \hat{T}_{pc}}{T_{pc} + B(1-B) \cdot \varepsilon} \quad (2.24)$$

حيث أن :

T_{pc} : درجة الحرارة الحرجة الزائفة للمزيج الغازي

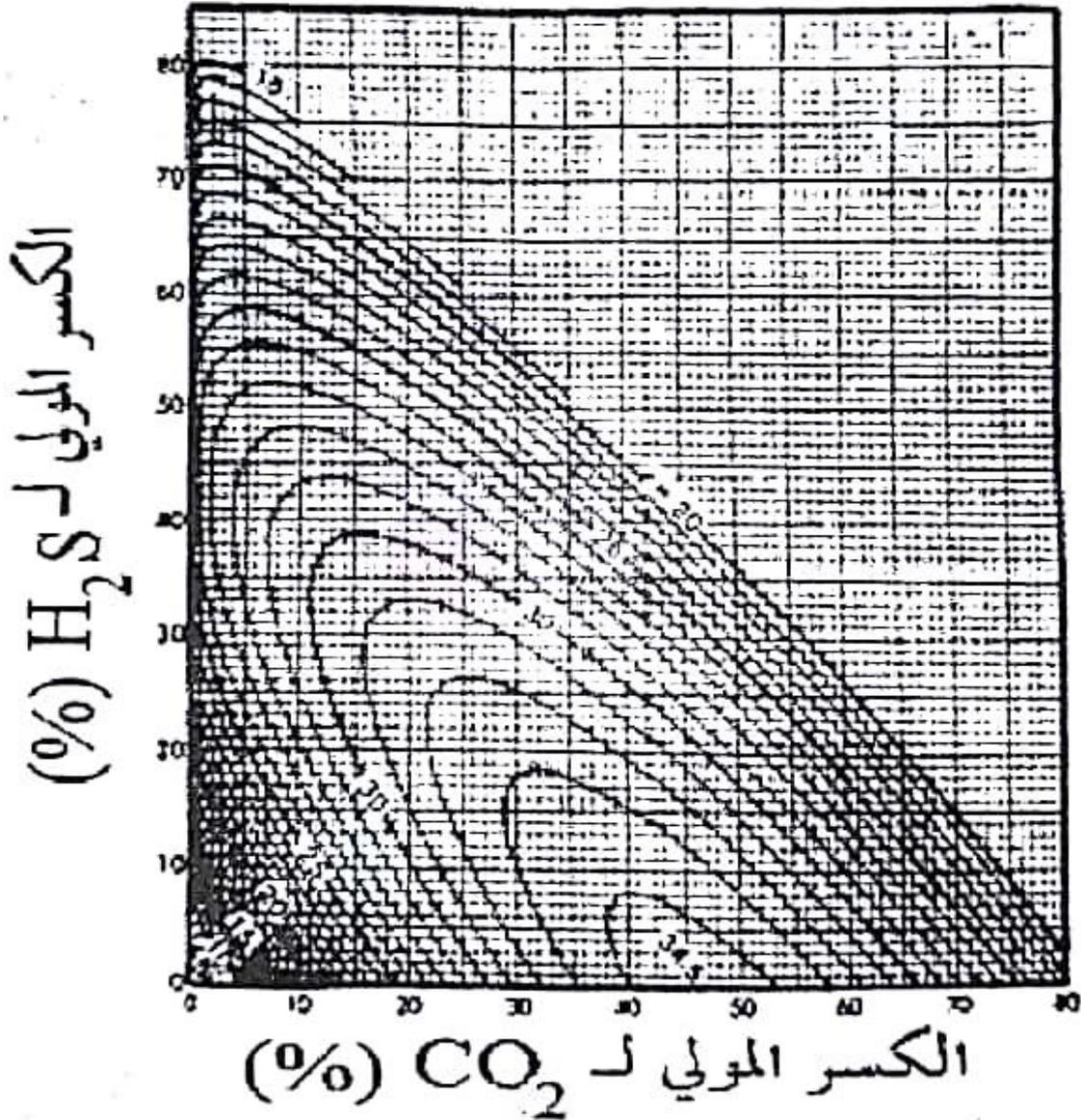
ρ_{pc} : الضغط الحرج الزائف للمزيج الغازي

\hat{T}_{pc} : درجة الحرارة الزائفة المصححة .

\hat{P}_{pc} : الضغط الحرج الزائف المصحح .

ε : معامل التصحيح ، والذي يمكن تعيينه بطريقتين :

1- باستخدام الشكل (2,3) التالي :



الشكل (2.3) تحديد قيمة معمل التصحيح E

2- باستخدام العلاقات الرياضية التالية :

$$E=120. (A^{0.9}-A^{1.6}) + 15. (B^{0.5}-B^4) \quad (2.25)$$

A: مجموع الكسر المولي لكل من غاز الكبريت الهيدروجين و ثاني اوكسيد الكربون في المزيج الغازي .

B: الكسر المولي لغاز كبريت الهيدروجين في المزيج الغازي.

ولكن عندما يكون تركيز غاز الآزوت كبيراً في المزيج الغازي من المفضل تعيين عامل الانضغاطية Z باستخدام طريقة (Carr-Kobayashi-Burrows) :

$$\dot{T}_{pc} = T_{pc} - 80 \cdot Y_{CO_2} + 130 \cdot Y_{H_2S} - 250 \cdot Y_{N_2} \quad (2, 26)$$

$$\dot{P}_{pc} = P_{pc} + 440 \cdot Y_{CO_2} + 600 \cdot Y_{H_2S} - 170 \cdot Y_{N_2} \quad (2, 27)$$

حيث أن :

T_{pc} : درجة الحرارة الحرجة الزائفة للمزيج الغازي.

P_{pc} : الضغط الحرج الزائف للمزيج الغازي .

\dot{T}_{pc} : درجة الحرارة الحرجة الزائفة المصححة .

\dot{P}_{pc} : الضغط الحرج الزائف المصحح.

6-2 العامل الحجمي للغاز:

يعرف عامل حجم الغاز بالنسبة بين حجم الغاز في الشروط الطبقيّة الى حجمه في الشروط السطحية

يتحدد عامل حجم الغاز (B_g) من العلاقة :

$$B_g = \frac{V_R}{V_{sc}} \quad (2-28)$$

حيث إن V_R الحجم الذي يشغله الغاز عند درجة حرارة المكمن وضغطه ويستخرج من العلاقة

$$V_R = \frac{z \cdot n \cdot R \cdot T}{P} \quad (2 - 29)$$

V_{sc} : الحجم الذي تشغله كتله الغاز نفسها عند الشروط القياسية يستخرج من العلاقة

$$V_{sc} = \frac{z_{sc} \times n \times R \times T_{sc}}{P_{sc}} \quad (2-30)$$

وبالتالي فإن (B_g):

$$B_g = \frac{z \times T \times P_{sc}}{z_{sc} \times T_{sc} \times P} \quad (2-31)$$

واحدة قياس B_g في الشروط القياسية مأخوذة من الجملة الإنكليزية (ft^3/scf)

$$B_g = 0.0282 \frac{z \times T}{P} \quad (2-32)$$

2-7 التوتر السطحي والتوتر بين السطوح:

التوتر السطحي للسائل هو خاصية تجعله أثناء تماسه مع الغاز أو البخار يسلك سلوكاً وكأنه مغطى بغشاء رقيق جداً معرض للشد ينتج هذا الشد على السطح من القوى بين الجزيئات داخل المحلول والتي تسبب تقلصاً للسطح المكشوف إلى أصغر مساحة ممكنة. تؤدي هذه الخاصية إلى تشكل قطرات السائل و فقاعات الصابون وتحذب وتقع السوائل ضمن الأنبوب. يقاس التوتر السطحي بوحدة N/m أو بميلي نيوتن / متر أو (dyn/cm) يتعلق التوتر بين السطحين بخواص المادتين المتلاصقتين لسطح التماس وتعتبر قيمة هذا التوتر ضرورية عند تحليل جريان طورين وآلية نقل الحرارة بينهما.

يقاس التوتر السطحي (σ) من العلاقة

$$\sigma = \varphi_0(1 - T_R)^\theta \quad (2-33)$$

حيث إن φ_0 مؤشر يمكن إيجاده من منحنيات تتعلق بالضغط والحرارة الحرجين

θ : أس يأخذ القيمة $(\frac{9}{11})$

T_R : درجة الحرارة (المصغرة)

2-8 الانحلالية :

هي كمية الغاز مقدرة (m^3) التي يمكن أن تنحل في ($1m^3$) من السائل .

إن قابلية انحلال الغازات الهيدروكربونية في الماء قليلة وخصوصاً عند القيم المنخفضة للضغط والحرارة ، وإن وجود الأملاح في المياه ووجود الآزوت في الغاز يقلل من قيم الانحلالية ، أما وجود غاز كبريت الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون يزيد من قيمتها بينما تكون الغازات الهيدروكربونية الثقيلة أقل انحلالية من الخفيفة في الماء . أما بالنسبة لانحلالية الغازات في النفط فهي أكبر بكثير من قيمتها في الماء وتزداد مع ازدياد الضغط حتى ضغط الإشباع وتحدد قيمتها من قانون هنري التالي:

$$V_g = a \cdot p \cdot V_p \quad (2, 34)$$

حيث إن :

V_g : حجم الغاز المنحل في ($1m^3$) من النفط

a : معامل الانحلالية

V_p : حجم النفط الذي ينحل فيه الغاز عند الضغط p .

9-2 رطوبة الغاز:

وهي محتوى الغاز من بخار الماء حيث أن كمية بخار الماء التي يحتويها الغاز الطبيعي عند شروط مختلفة من الضغط ودرجة الحرارة يجب أن تكون معلومة من أجل التوصل إلى علاقة إنتاج الماء السطحي بأحجام مماثلة في الممكن. ويتم التعبير عن محتوى بخار الماء في الغاز بتعبيرين هما:

1- الرطوبة المطلقة : وهي كمية بخار الماء الموجود في واحدة الحجم من الغاز وتقدر بوحدة (gm/m^3) أو $(\text{kg}/1000\text{m}^3)$

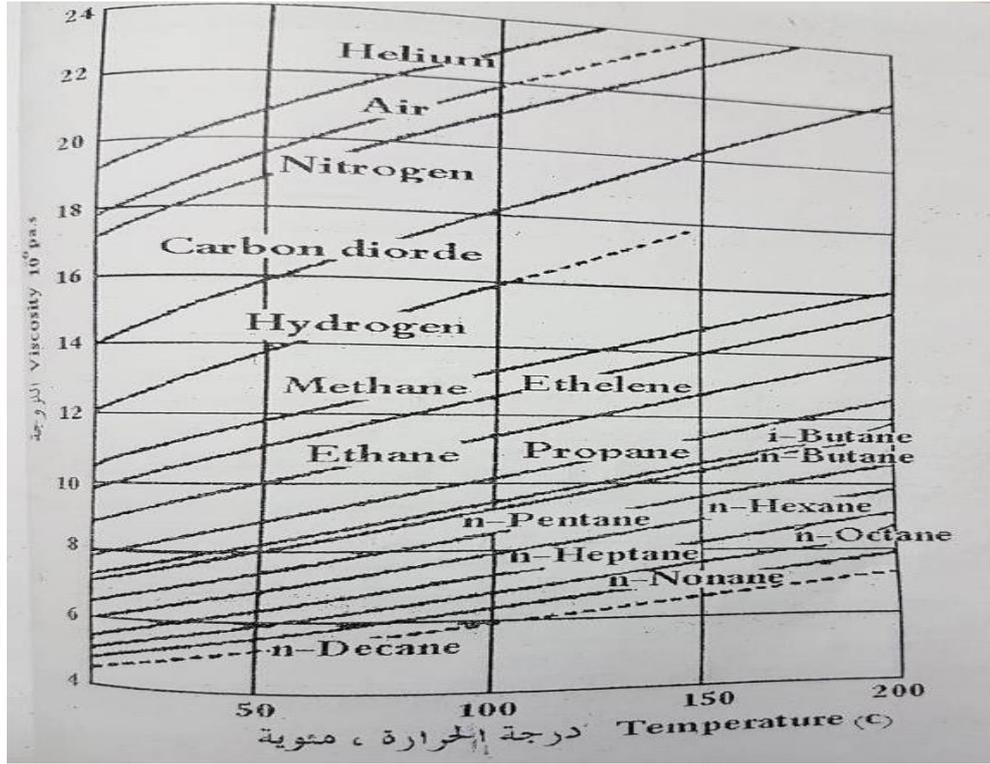
2- الرطوبة النسبية : كمية بخار الماء الموجودة فعلياً في واحدة الحجم من الغاز عند قيم معينة من الضغط و الحرارة إلى الكمية العظمى التي يمكن أن يحتويها الغاز في حالة الإشباع عند نفس الشروط .

وبشكل عام تتعلق رطوبة الغازات الطبيعية بقيم الضغط و الحرارة و تركيب الغاز و ملوحة المياه المرافقة . وسيتم شرح طرق تحديد رطوبة الغاز بشكل مفصل في الفصل الثالث .

10-2 لزوجة الغازات gas viscosity

تصف لزوجة الغازات مقاومة الانزلاق أو حركة جزء من الغاز بالنسبة إلى الآخر تسمى معامل اللزوجة الديناميكية.

تختلف اللزوجة الديناميكية للغازات باختلاف درجة الحرارة والضغط وإذ تتزايد عند الضغوط المنخفضة مع ازدياد درجة الحرارة، وتتناقص عند الضغوط المرتفعة كما يبين ذلك الشكل (2-4)



الشكل (2.4) يبين لزوجة مركبات الغاز الطبيعي عند الضغط الجوي

لتحديد اللزوجة أهمية في:

- 1- عمليات انتقال الحرارة وفصل الغاز والنفط
- 2- عمليات تنظيف الغاز من المعلقات الصلبة
- 3- تعتبر معرفتها ضرورية لحساب حركة الغازات في الطبقة وأبواب نقل الغاز او التجهيزات السطحية المختلفة.

في الجملة الدولية ، تقاس اللزوجة ب (N.S / m²) وعادةً تسمى بالباسكال ثانية (Pa.s) كما تقاس اللزوجة الكينماتيكية ($\nu = \frac{\mu}{\rho}$) ب (m²/ S) و أحياناً تستخدم واحدة السنتي ستوكس (c.st) لقياسها وتساوي (m m²/S) ويمكن استخدام نوموغرام لتحديد اللزوجة الديناميكية بمعرفة الكثافة النسبية للغاز.

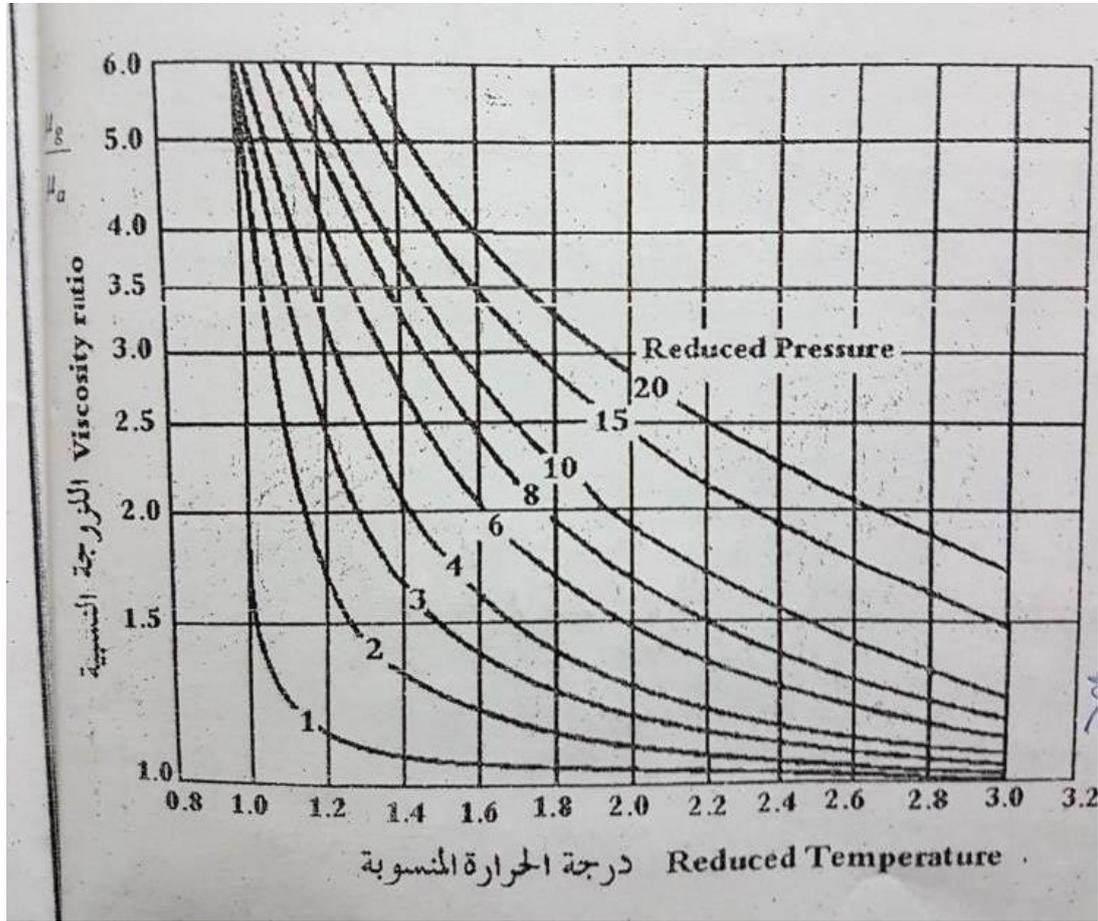
يمكن تحديد لزوجة المزيج الغازي اذا علم تركيب الغاز من علاقه هيرتنغ:

$$M = \frac{\sum \mu_1 \times \gamma_1 \times M_1^{1/2}}{\sum \gamma_1 \times M_1^{1/2}} \quad (2-35)$$

حيث أن:

M_1, γ_1, μ_1 :: اللزوجة والوزن الجزيئي و الكسر المولي لكل مركب.

وكذلك توجد منحنيات كاتس (KATZ) التي تعطينا إمكانية الحصول على اللزوجة الديناميكية للغازات الطبيعية عند ضغوط مختلفة ، كنسبة بين اللزوجة عند الضغط المطلوب واللزوجة عند الضغط الجوي بالعلاقة مع الضغط و الحرارة المنسوبين للمزيج وذلك بعد الحصول على قيمة لزوجة الغاز الطبيعي عند الضغط الجوي .



الشكل رقم (2.5) يبين اللزوجة النسبية بالعلاقة مع الضغط و الحرارة المنسوبين

2-11 انفلات الغاز (فعل جول و طومسون) :

خلال مسير الغاز من الطبقة إلى السطح ثم الفواصل فإنه سوف يمر من خلال تضيقات و اختناقات و عبر المقاطع و التجهيزات مما يؤدي إلى تغير في الضغط و الذي سيرافقه تغير في درجة الحرارة نتيجة ضياع قسم من الطاقة للتغلب على قوى التجاذب الجزيئية ، و يتم ذلك دون حدوث أي تبادل حراري أو عمل مع الوسط الخارجي .

إن مقدار هذا التغير في درجة حرارة الغاز عند انخفاض الضغط بمقدار واحد ضغط جوي يسمى بمعامل "جول - طومسون" و يحسب هذا المعامل للغاز الطبيعي بالعلاقة التالية :

$$D_i = \frac{T_{cr} \cdot f(d_i)}{P_{cr} \cdot C_p} \quad (2 , 36)$$

حيث أن :

D_i : معامل "جول-طومسون"

T_{Cr} : درجة الحرارة الحرجة

P_{Cr} : الضغط الحرج

C_p : الحرارة النوعية عند ضغط ثابت

$f(d_i)$: معامل يتم تحديده بالعلاقة مع درجة الحرارة و الضغط المخفضين وفق مخطط خاص

2-12 تشكل الهيدرات (هيدرات الغاز الطبيعي) :

عندما يكون الغاز في تماس مع الماء يحدث تشوه او خلل للروابط الهيدروجينية في جزيئات الماء مما يؤدي الى ازدياد الحجم المولي للماء (الطبقة السطحية للماء) ، ونتيجة التشوه الحاصل للروابط تنتج بنية متكهفة لجزيئات الماء وهذه البنية تعتبر مناسبة لامتناس جزيئات الغاز وعندما يبلغ عدد جزيئات الغاز قيمة معينة يحدث تغير طوري للماء كنتيجة للتغيرات في الطاقة الناجمة عن عمليات الامتناس وكلما انخفضت درجة الحرارة وازداد الضغط يزداد عدد جزيئات الغاز المحتواة في واحدة الحجم من الطبقة السطحية للماء وفي مثل هذه الظروف تتكون مركبات بلورية بيضاء نتيجة للاتحاد الفيزيائي للغاز الطبيعي مع الماء.

الظروف التي تساعد على تكوين الهيدرات هي التالية :

(1) وجود الغاز عند درجة حرارة أقل من نقطة الندى .

(2) وجود ضغط عالي .

(3) وجود المياه الحرة.

2-13 الخصائص الكيميائية و الترموديناميكية للغازات الطبيعية :

2-13-1 احتراق الغازات الطبيعية :

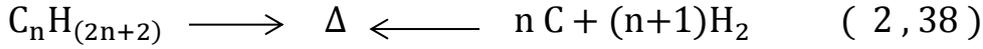
يحترق الغاز الهيدروكربوني معطيا غاز ثاني اوكسيد الكربون وبخار الماء وفق المعادلة التالية :



عمليا تحترق الغازات الطبيعية بلهب ازرق وتتراوح درجة اشتعالها عند الضغط الجوي بين (650.....700) درجة مئوية . وتتناقص درجة الاشتعال بازدياد الضغط .

2-13-2 تفكك الغازات الطبيعية :

يتفكك الغاز الطبيعي بالتسخين معطياً الكربون والهيدروجين وفق المعادلة :



ويتعلق التفكك بشكل رئيسي بالضغط فبازدياد الضغط تتناقص نسبة الغاز المتفكك

2-13-3 الطاقة الحرارية:

وتعبر عن كمية الحرارة المتحررة عن احتراق واحدة الكتلة من الغاز الطبيعي و يمكن ان نميز نوعين هما :

● **الطاقة الحرارية الدنيا :** وهي كمية الحرارة الناتجة عن احتراق ($1m^3$) من الغاز احتراقاً كاملاً مع الاخذ بعين الاعتبار ما يلي :

1. أن يكون للغاز المحترق والهواء اللازم للاحتراق والغازات الناتجة عن الاحتراق نفس الضغط والحرارة

2. اعتبار المياه (الموجودة في الغاز المحترق - الناتجة عن الاحتراق) على شكل بخار بعد الاحتراق

● **الطاقة الحرارية العليا :** وهي كمية الحرارة الناتجة عن الاحتراق ($1m^3$) من الغاز احتراقاً كاملاً مع الاخذ بالاعتبار ما يلي :

1. أن يكون للغاز المحترق وللحواء اللازم للاحتراق والغازات الناتجة عن الاحتراق نفس الضغط والحرارة .

2. اعتبار المياه (الموجودة في الغاز المحترق - الناتجة عن الاحتراق على شكل سائل بعد الاحتراق .

2-13-4 الحرارة النوعية (السعة الحرارية النوعية) :

وهي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحدة الكتلة (أو واحدة الحجم) لمادة ما درجة واحدة ، وتعتمد بشكل اساسي على درجة الحرارة والضغط .

واعتماداً على شروط العملية الحرارية التي يخضع لها الغاز يمكن تصنيف حرارته النوعية إلى نوعين :

(1) الحرارة النوعية عند ضغط ثابت

(2) الحرارة النوعية عند حجم ثابت

ومن أجل تسهيل استخدامها نستخدم مفهوم السعة الحرارية المولية أو الكتلية وواحدتها (جول.كيلو غرام/ درجة) أو (جول.كيلومول/ درجة) .

وتحدد من العلاقة التالية :

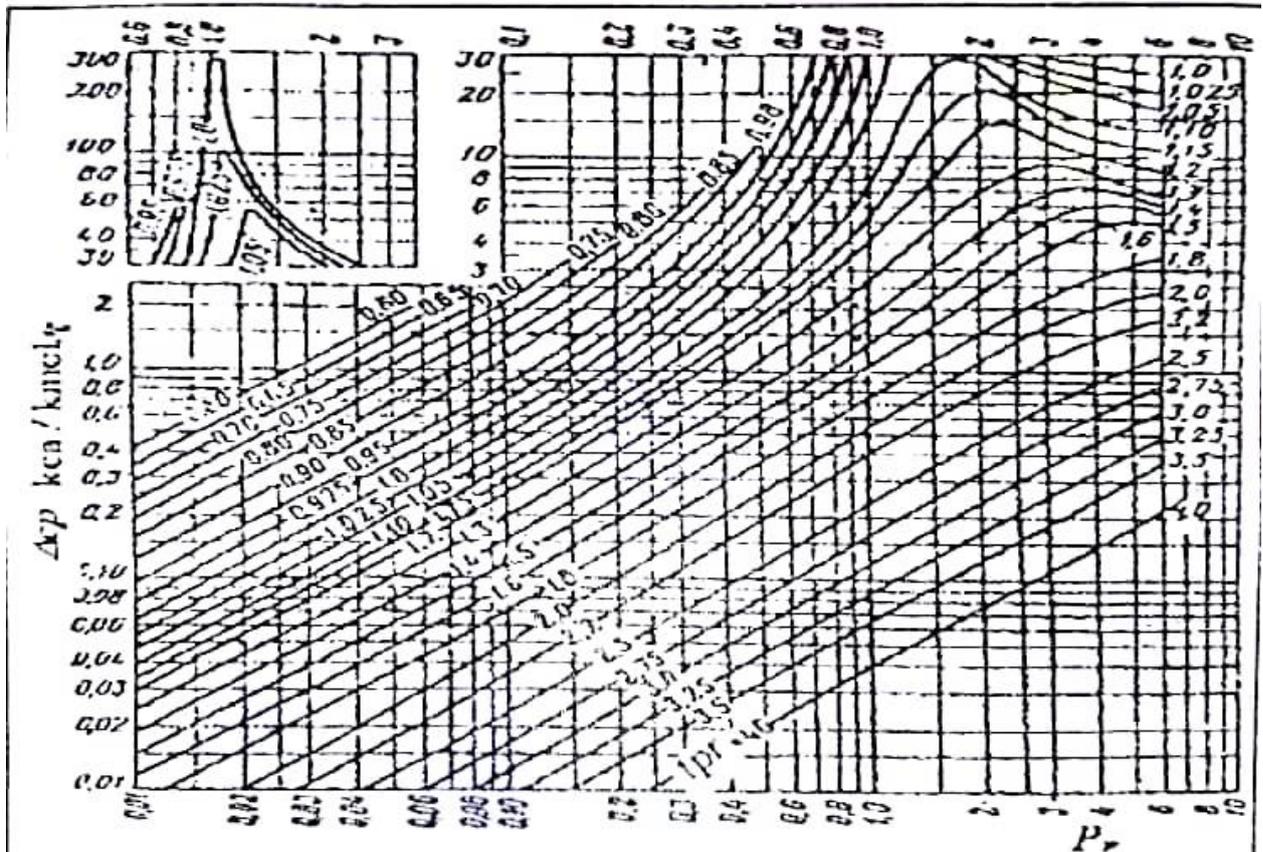
$$C_p = C_{p^0} + \Delta C_p \quad (2 , 39)$$

. C_p : السعة الحرارية عند الضغط p .

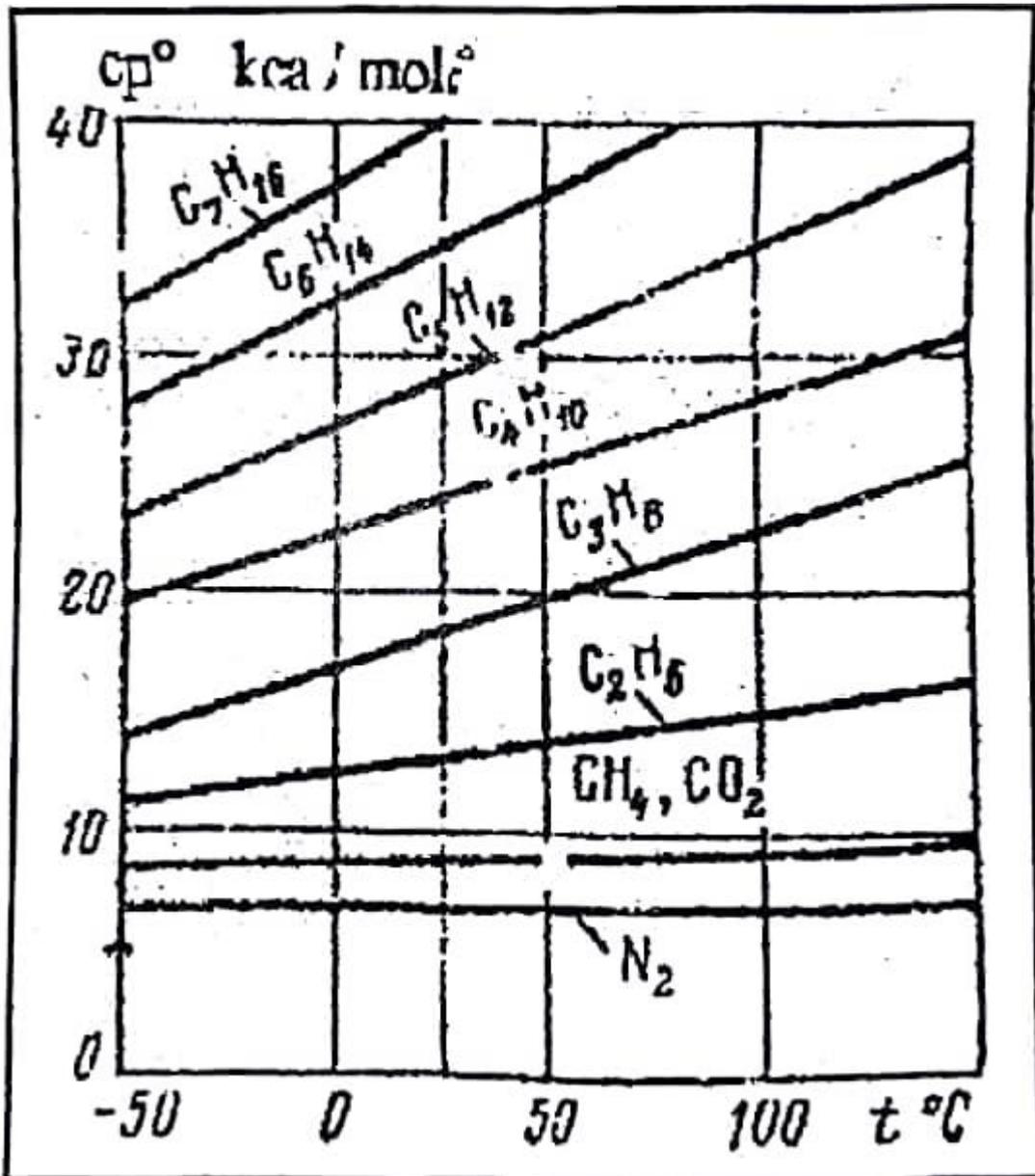
. C_{p^0} : السعة الحرارية عند الضغط الجوي والحرارة T .

ΔC_p : عامل تصحيح يتعلق بالضغط ،

ويحدد من الغاز كما في الشكل (6 ، 2) التالي :



الشكل (2,6) حساب ΔC_p بالعلاقة مع الضغط



الشكل (2,7) السعة الحرارية لغاز وحيد المركب بدلالة درجة الحرارة

أما في حالة المزيج الغازي فنستخدم العلاقة التالية :

$$C_{P_{\max}}^{\circ} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot C_{P_i}^{\circ} \quad (2, 40)$$

حيث أن :

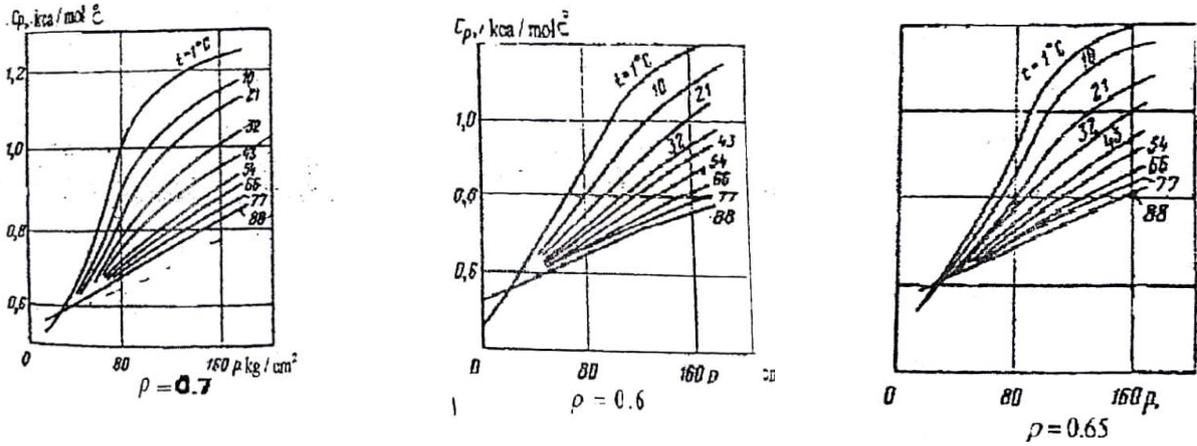
$C_{P_i}^{\circ}$: السعة الحرارية للمركب الغازي i . عند الضغط الجوي الشكل (2, 7).

y_i : الكسر المولي للمركب الغازي i .

في حالة احتواء الغاز على مركبات غير هيدروكربونية فإن سعتها الحرارية تساوي تقريباً نصف السعة الحرارية للمركبات الهيدروكربونية المشابهة لها في الكتلة .

أما ΔC_p فيحدد من الشكل التالي بالعلاقة مع الضغط والحرارة المصغرين .

وفي الحالة التي يكون فيها تركيب الغاز غير معروف فإننا نعلم قيمة الكثافة فقط لتحديد السعة الحرارية كما في الشكل التالي :



الشكل (8 ، 2) السعة الحرارية للغاز عند كثافات مختلفة

5-11-2 الناقلية الحرارية :

هي قدرة الغازات على نقل الحرارة . ويتم نقل الحرارة بالغازات عن طريق التصادم بين جزيئاتها . ويعبر عنها بمعامل الناقلية الحرارية (λ_Q) والذي يعتمد على درجة الحرارة بشكل أساسي .

$$\lambda_{(g.T)} = \lambda_{(g.N)} \cdot \left(\frac{T}{T_N} \right)^{3/2} \quad (2 , 41)$$

حيث أن :

$\lambda_{(g.T)}$: معامل الناقلية الحرارية عند درجة الحرارة .

$\lambda_{(g.N)}$: معامل الناقلية الحرارية عند الشروط النظامية .

الفصل الثالث

تجفيف الغازات الطبيعية

مقدمة:

تعتبر رطوبة الغازات الطبيعية من أهم العوامل في تكنولوجيا معالجة الغاز من أجل ضخه في أنابيب نقله ، فالغاز يكون في الشروط الطبقيّة دائماً مشبعاً ببخار الماء ولكن عند حركة الغاز في مواسير الإنتاج ينخفض كل من الضغط و درجة الحرارة ولكن عملياً يكون انخفاض درجة الحرارة اسرع واكبر من انخفاض الضغط . فمع انخفاض درجة الحرارة تنقص كمية بخار الماء في الطور الغازي و ذلك نتيجة لتكاثف جزء من هذا البخار وتحوّله إلى الطور السائل (مياه سائلة) .

تحوي الغازات الطبيعية عملياً في الشروط النظامية على كميات محددة من بخار الماء تتراوح بين $(20g/m_N^3 \div 4g/m_N^3)$. يمكن التعبير عن محتوى الرطوبة في الغازات الطبيعية باستخدام إحدى البارامترات التالية :

الرطوبة المطلقة (Absolute Humidity): وهي كتلة بخار الماء المتواجد في واحدة الحجم من الغاز في الشروط النظامية.

الرطوبة النسبية (Relative Humidity) : وهي نسبة كتلة بخار الماء الموجودة في واحدة الحجم من الغاز الرطب إلى كتلة بخار الماء اللازمة لجعل نفس هذا الحجم من الغاز مشبعاً عند نفس الشروط من الضغط و درجة الحرارة .

الرطوبة النوعية (Specific Humidity) : وهي نسبة كتلة بخار الماء الموجود في واحدة الحجم من الغاز الرطب إلى كتلة الغاز الجاف الموجود في نفس الحجم عند نفس الشروط من الضغط و درجة الحرارة . بالإضافة إلى ذلك فإن عمليات تحلية الغاز الطبيعي المنجزة باستخدام المحاليل المائية للأمينات أو كربونات البوتاسيوم قد تؤدي إلى إثباع الغاز بالماء .

إذاً فالتجفيف هي عملية تستخدم لإزالة بخار الماء من الغازات الطبيعية أو من سوائل الغازات الطبيعية (NGL) بشكل جزئي (حتى نقطة ندى معينة) أو بشكل كلي (حتى 0.5 ppm ÷) وذلك بهدف :

1) منع تجمع المياه الحرة و تلافى تشكل الهيدرات في تجهيزات وحدات المعالجة والنقل.

2) الحصول على غازات مجففة جزئياً أو كلياً طبقاً للمواصفات المطلوبة .

3) تلافى حدوث عمليات التآكل .

يمكن أن نذكر من أهم التقنيات المستخدمة لتجفيف الغازات الطبيعية و المكثفات المرافقة وسوائل الغازات الطبيعية ما يلي :

- الإمتصاص (Absorption) باستخدام مجففات سائلة (Liquid Desiccants) .

-الإمتزاز (Adsorption) باستخدام مجففات صلبة (solid Desiccants) .

-التجفيف بواسطة كلور الكالسيوم ($CaCl_2$) .

-التجفيف بالتبريد (Refrigeration) .

-التجفيف باستخدام الأغشية النفوذة (Membrae Permeation) .

-التجفيف بواسطة التقطير (Distillation) .

3-1 محتوى الرطوبة في الغازات الطبيعية:

تعتمد درجة إشباع الغاز ببخار الماء بشكل رئيسي على كل من تركيب الغاز والضغط ودرجة الحرارة بالإضافة إلى تركيز الأملاح المنحلة في الماء الحرة المتواجدة في تماس مع الغاز ، ويحدد محتوى الرطوبة في الغازات الطبيعية إما تجريبياً أو حسابياً و ذلك بواسطة معادلات خاصة أو بواسطة استخدام أشكال بيانية معينة .

3-1-1 محتوى الرطوبة في الغازات الطبيعية الحلوة :

يمكن تحديد محتوى الرطوبة في الغازات الطبيعية ذات الكثافة النسبية ($\Delta = 0,6$) و الحاوية على أكثر من ($70\% CH_4$) والمتواجدة في تماس مع المياه النقية باستخدام الشكل (3.1) .

أما في حالة الغازات الطبيعية ذات الكثافات النسبية الأصغر أو الأكبر من القيمة المذكورة أعلاه و المتواجدة في تماس مع المياه المالحة فيمكن التنبؤ عن محتوى بخار الماء فيها بعد إيجاد قيمة كل من معامل تصحيح الكثافة النسبية (C_Δ) و معامل تصحيح و تركيز الأملاح (C_S) وذلك باستخدام المنحنيين الموجودين في الزاوية اليسارية العلوية للشكل (3.1) .

كما يمكن تعيين محتوى الرطوبة في الغازات الطبيعية ذات ($\Delta = 0,6$) و ذات الضغوط و درجات الحرارة الواقعة في مجالات التالية على التوالي

[1 ÷ 690 bar] و [- 40 ÷ +110 °C] باستخدام العلاقة التحليلية التالية :

$$W = \frac{A}{P} + B \quad (3.1)$$

حيث أن :

W : محتوى الرطوبة في الغاز (g/m^3)

A , B : ثوابت تؤخذ من الجدول (3,1)

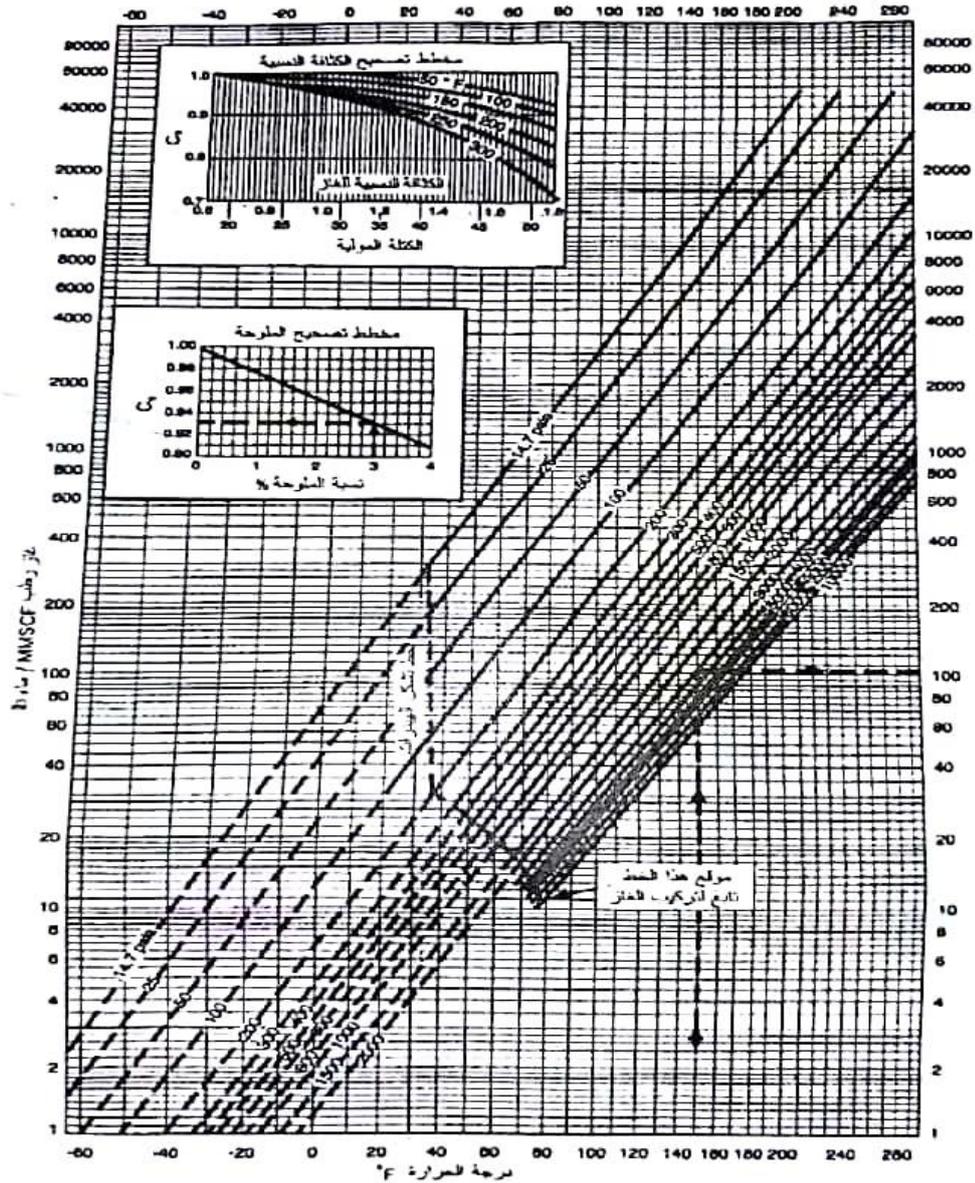
P : ضغط الغاز (atm) .

في حين يمكن تحديد كمية الماء المحتواة في الغازات الطبيعية التي كثافتها النسبية أكبر أو أصغر من (0,6) باستخدام العلاقة التالية :

$$w = \left(\frac{A}{P} + B \right) \times C_{\Delta} \times C_S \quad (3.2)$$

C_{Δ} : معامل تصحيح الكثافة النسبية .

C_S : معامل تصحيح تركيز الأملاح في المياه المتواجدة على تماس مع الغاز .



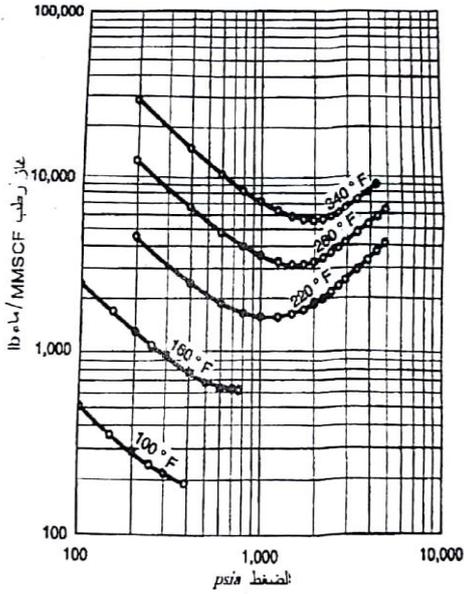
الشكل (3,1) مخطط توازن محتوى بخار الماء في الغازات الطبيعية الحلوة

T	A	B	T	A	B
-40	0.1451	0.0034	+32	36.1	0.1895
-38	0.1780	0.0040	+34	40.5	0.207
-36	0.2189	0.0046	+36	45.2	0.224
-34	0.2670	0.0053	+38	50.8	0.242
-32	0.3235	0.0062	+40	56.25	0.263
-30	0.3930	0.0071	+42	62.7	0.285
-28	0.4715	0.0080	+44	69.25	0.310
-26	0.5560	0.0092	+46	76.7	0.335
-24	0.6775	0.0104	+48	85.29	0.363
-22	0.8090	0.0116	+50	94	0.391
-20	0.960	0.0134	+52	103	0.422
-18	1.1440	0.0151	+54	114	0.454
-16	1.350	0.0170	+56	126	0.487
-14	1.590	0.0192	+58	138	0.521
-12	1.868	0.0211	+60	152	0.562
-10	2.188	0.0229	+62	166.5	0.599
-8	2.550	0.0271	+64	183.3	0.645
-6	2.990	0.0303	+66	200.5	0.691
-4	3.480	0.0338	+68	219	0.741
-2	4.030	0.0377	+70	238	0.793
0	4.670	0.0418	+72	260	0.841
+2	5.400	0.0464	+74	283	0.902
+4	6.225	0.0515	+76	306	0.965
+6	7.150	0.0571	+78	335	1.023
+8	8.200	0.0630	+80	363	1.083
+10	9.390	0.0696	+82	394	1.148
+12	10.72	0.0767	+84	429	1.205
+14	12.39	0.0855	+86	462	1.250
+16	13.94	0.0930	+88	501	1.290
+18	15.75	0.1020	+90	537.5	1.327
+20	17.87	0.1120	+92	582.5	1.367
+22	20.15	0.1227	+94	624	1.405
+24	22.80	0.1343	+96	672	1.445
+26	25.50	0.1453	+98	725	1.487
+28	28.70	0.1595	+100	776	1.530
+30	32.30	0.1740	+110	1093	2.620

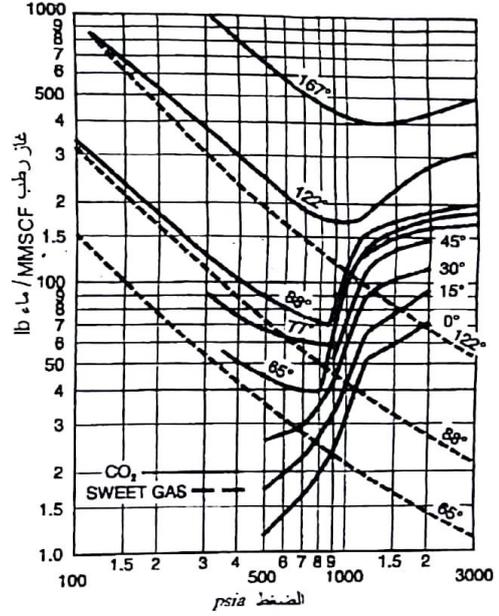
الجدول (3,1)

2-1-3 محتوى الماء في الغازات الحاوية (CO_2) و (H_2S) :

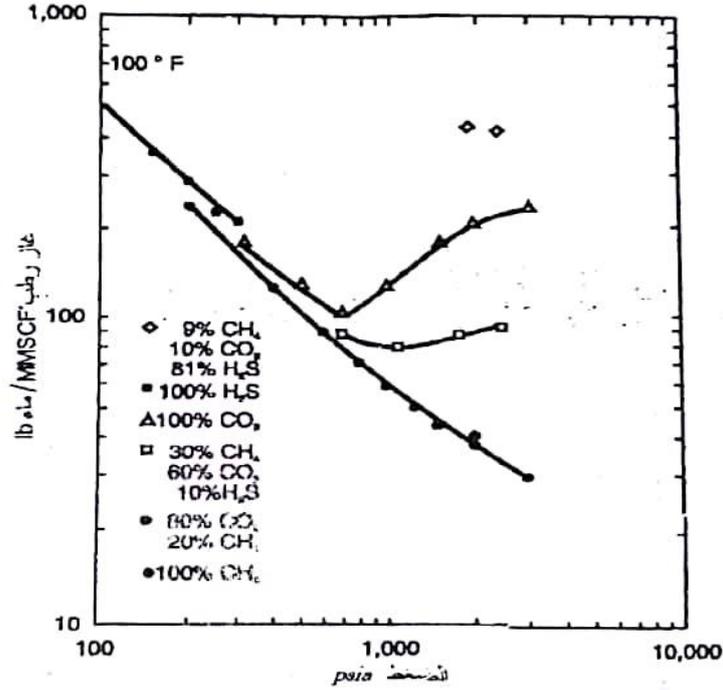
يحتوي كل من غازي (CO_2) و (H_2S) في حالة الأشباع على كمية أكبر من الرطوبة من تلك التي يمكن أن تحتويها أمزجة الغازات الطبيعية الحلوة أو الميتان ، و تتفاوت هذه الكمية إلى حد كبير تبعاً لدرجة الحرارة و الضغط . لاحظ الأشكال (3,2) و (3,3) و (3,4)



الشكل (3,3) محتوى الرطوبة في غاز (H_2S) عند ضغوط و درجات حرارة مختلفة.



الشكل (3,2) ، محتوى الرطوبة في غاز (CO_2) النقي عند ضغوط و درجات الحرارة المختلفة.



الشكل (3,4) محتوى الرطوبة في كل من غاز الميثان النقي و غاز CO_2 النقي و بعض الأمزجة الغازية عند ضغوط مختلفة و درجة الحرارة ($100^\circ F$)

يمكن أن نستنتج من الأشكال السابقة النتائج الهامة التالية :

- إن محتوى الرطوبة في كل من غازي (CO_2) و (H_2S) النقيين أكبر بشكل ملحوظ من تلك المحتواة في الغاز الطبيعي الحلو و خصوصاً عند ضغوط أعلى من (700 psia) و درجة حرارة الوسط المحيط .
- يجب تطبيق بعض التصحيحات في حالة احتواء المزيج الغازي على أكثر من (5%) من غاز (CO_2) أو / و غاز (H_2S) عند الضغوط الأعلى من (700 psia) ، و تصبح هذه التصحيحات أكثر أهمية عند الضغوط و التراكيز الأعلى .
- إن إضافة كميات قليلة من غاز (CH_4) أو (N_2) إلى (CO_2) أو (H_2S) يؤدي إلى تخفيض محتوى الرطوبة مقارنة مع الغاز الحامضي النقي .

يجب الإشارة إلى أن تحديد محتوى بخار الماء من الغازات الطبيعية الحاوية على كميات كبيرة من الغازات الحامضية يعتبر من العمليات المعقدة جداً كما أن البيانات و الأشكال المقدمة سابقاً تم وضعها استناداً إلى مجموعة من المعطيات التجريبية .

يمثل استخدام المعادلة (3,3) و الأشكال (1، 3) ، (3,5) و (3,6) إحدى الطرق المستخدمة في تقدير محتوى الماء في أمزجة الغازات الطبيعية الحاوية على أقل من (40%) غازات حامضية :

$$W = y_{HC}W_{HC} + y_{CO_2}W_{CO_2} + y_{H_2S}W_{H_2S} \quad (3,3)$$

حيث أن :

W : محتوى الرطوبة في المزيج الغازي الحامضي ، (lb / MMSCF)

W_{HC} : كمية الرطوبة المحتواة في المركبات الهيدروكربونية الغازية المأخوذة من الشكل (3,1) ، (lb / MMSCF)

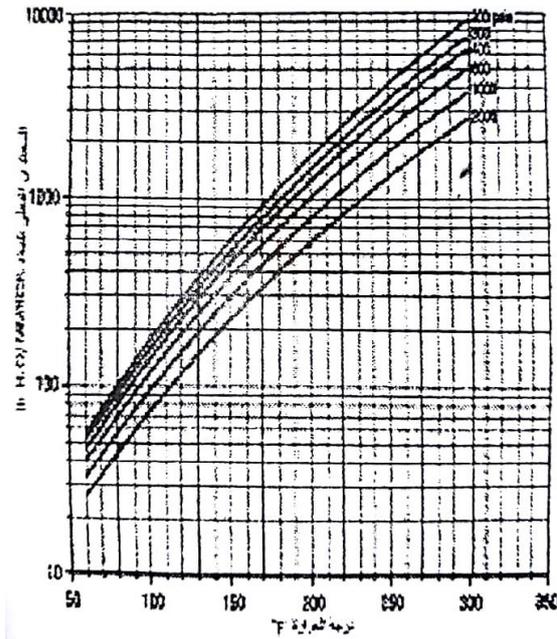
y_{HC} : الكسر المولي للمركبات الهيدروكربونية الغازية في المزيج الغازي .

W_{CO_2} : كمية الرطوبة المحتواة في غاز ثنائي أوكسيد الكربون مقروءة من الشكل (3,5) ، (lb / MMSCF)

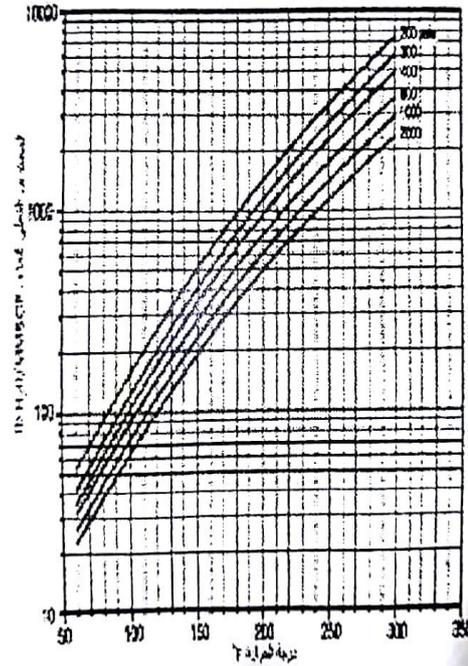
y_{CO_2} : الكسر المولي لغاز ثنائي أوكسيد الكربون في المزيج .

W_{H_2S} : كمية الرطوبة المحتواة في غاز الهيدروجين مقروءة من الشكل (3,6) ، (lb / MMSCF)

y_{H_2S} : الكسر المولي لغاز الكبريت الهيدروجين في المزيج .



الشكل (3,6) كمية الرطوبة المحتواة في (H_2S) و المتواجد في المزيج الغازي



الشكل (3,5) كمية الرطوبة المحتواة في (CO_2) المتواجدة في المزيج الغازي

ملاحظة هامة :

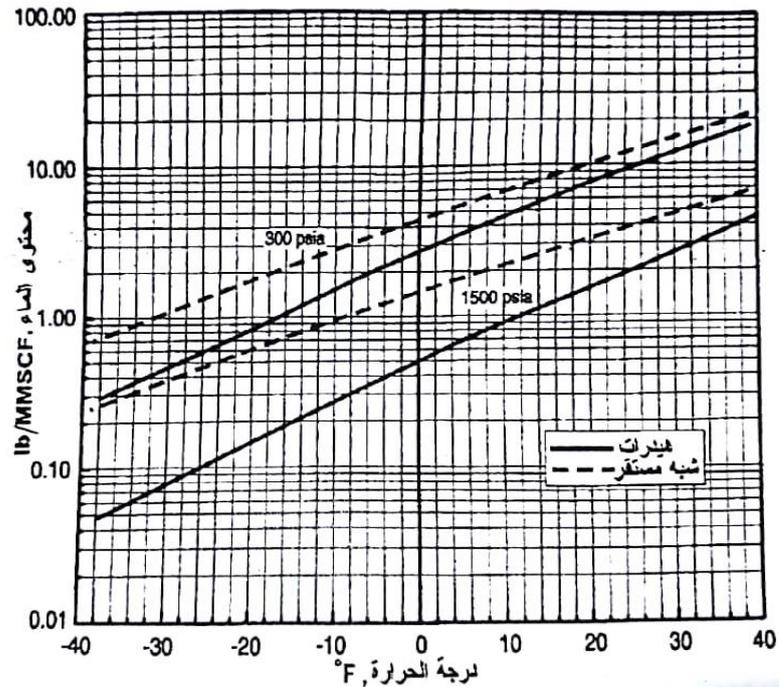
لا تمثل القيم المأخوذة من الشكلين (3,5) و (3.6) قيم محتوى الرطوبة في غازي (CO_2) و (H_2S) النقيين وإنما تمثل قيم محتوى الرطوبة في هذين الغازين عند تواجدهما في المزيج الغازي .

3-1-3 محتوى الماء بالغاز في منطقة الهيدرات (Hydrate Region) :

لقد تم وضع الشكل (3.1) على أساس الفرضية التالية : (إن للماء المتكاثف طور سائل) ، ولكن عند درجات حرارة أخفض من درجة حرارة تشكل الهيدرات سيكون لهذا الماء المتكاثف طور صلب ، و بناءً عليه يمكن الاستنتاج بأن محتوى الرطوبة في الغاز المتواجد في حالة توازن مع الهيدرات سيكون أقل منه مقارنة مع الغاز المتواجد في حالة توازن مع السائل شبه المستقر (Metastable Liquid) .

يطلق عادةً على الماء السائل و الموجود في حالة توازن مع الغاز خلال فترة تشكل الهيدرات مصطلح الماء شبه المستقر ، و يعتمد محتوى الرطوبة في الغاز المتواجد في منطقة تشكل الهيدرات بشكل رئيسي على تركيب الغاز ، تواجد مواقع النوى البلورية في الطور السائل ، درجة المزج الخ .

من الضروري جداً عند تصميم أنظمة التجفيف (Dehydration Systems) و خصوصاً أنظمة (TEG) تحديد محتوى الرطوبة في الغاز المتواجد في حالة توازن مع الهيدرات و ذلك من خلال استخدام علاقات ارتباط تشبه تلك الممثلة بالشكل (3.7) ، و ذلك بهدف الحصول على أخفض نقطة ندى للماء (Water Dewpoint) ، ولكن في حال عدم توفر المعطيات التجريبية يمكن الاعتماد على بعض العلاقات الترموديناميكية في تقدير هذا المحتوى .



الشكل (3,7)

3-1-4 طرق تحديد محتوى الرطوبة مخبرياً :

يمكن قياس محتوى الرطوبة في الغاز مخبرياً بواسطة ثلاث طرق مختلفة :

(1) **مراقبة نقطة الندى (Observation Of The Dew Point)** : و تعتمد تقنية القياس في هذه الطريقة بشكل اساسي على استخدام مرآة مبردة (Cooled mirror) بغية تحديد درجة الحرارة التي تتكاثف عندها قطرات الماء (Water Condensation Temperature) ، ولكن من عيوبها انه في بعض الحالات يصعب التمييز بين نقطة ندى الماء و نقطة ندى المركبات الهيدروكربونية (Hydrocarbon Dew Point) .

(2) **طريقة الامتزاز باستخدام فوق كلورات المغنيزيوم (Magnesium Perchlorate)** : حيث يتم تحديد كمية الماء الممتزة على هذا الوسيط باستخدام الطريقة الثقيلة (Gravimetric Method) .

(3) **طريقة كارل-فيشر (Karl-Fischer Method)** : تعتبر هذه الطريقة من أكثر الطرق شيوعاً و تعتمد على مبدأ امتصاص بخار الماء المتواجد في الغاز بواسطة محلول ما ، و في ما بعد يتم قياس محتوى الرطوبة من خلال معرفة كمية الغاز اللازمة لجعل كاشف كارل-فيشر (Karl-Fischer Reagent) حيدياً .

3-2 إمكانية تشكل الهيدرات في أنظمة الغاز الطبيعي (Hydrates in Natural Gas) : (Systems)

تبدي الغازات الطبيعية المشبعة ببخار الماء و في شروط معينة من الضغط و الحرارة و بوجود الماء السائل قابلية كبيرة لتشكل مركبات صلبة تدعى الهيدرات ، فالهيدرات بالتعريف هي اتحاد فيزيائي بين بعض الجزئيات الهيدروكربونية وبخار الماء عند شروط من الحرارة المنخفضة نسبية و الضغوط المرتفعة و بوجود الماء السائل و هذه الظاهرة ذات أهمية بالغة في الصناعة الغازية و ذلك لأن مثل هذه الجزئيات الصلبة يمكن أن تتشكل عند درجة حرارة و ضغط متواجدين بشكل طبيعي أثناء إنتاج و نقل الغازات الطبيعية .

3-2-1 بنية و تركيب الهيدرات :

لقد اظهرت الدراسة أن جزئية هيدروكربونية واحدة تتحد مع (6-7) جزئيات من الماء مشكلة بلورات بيضاء اللون تشبه في مظهرها الخارجي قطع الثلج أو الجليد وذات كثافة تتراوح بين ($880 \div 900 \text{ Kg}/\text{m}^3$) لذا تطفو على سطح الماء و تعطي عند احتراقها بخار الماء و ثنائي أوكسيد الكربون .

إن الهيكل الاساسي للشبكة البلورية الهيدراتية مكون من جزئيات الماء في حين تشغل جزئيات المركبات الهيدروكربونية (N_2)، (CO_2) و (H_2S) تجاوب هذه الشبكة يمكن أن نميز عملياً بين ثلاثة أنواع من التراكيب البلورية للهيدرات وهي على التوالي :

1- النوع (I) :

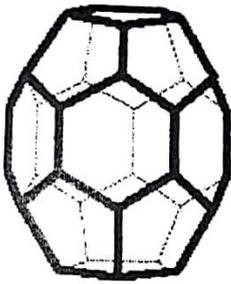
- يتشكل من الجزئيات ذات الاقطار الصغيرة (H_2S, C_2H_6, CO_2, CH_4) .
- يتألف من (46) جزيئة ماء و (8) جزئيات غاز ، وعليه يمكن التعبير عن التركيب النظري لهذا النوع على النحو ($8X_g. 46 H_2O$) أو ($X_g. 5,75 H_2O$) ، لاحظ الشكل (3,8).

2- النوع (II) :

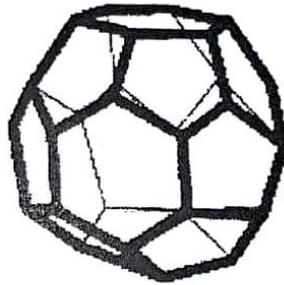
- يتشكل من جزئيات المركبات الهيدروكربونية الأكبر نسبياً ($C_3H_8, i-C_4H_{10}, n-C_4H_{10}$) .
- يتألف من (136) جزيئة ماء و (24) جزئيات غاز ، وبالتالي يمكن أن يأخذ التركيب النظري لهذا النوع الشكل التالي ($24X_g. 136 H_2O$) أو ($X_g. 5,75 H_2O$) ، لاحظ الشكل (3,9).

3- النوع (H) :

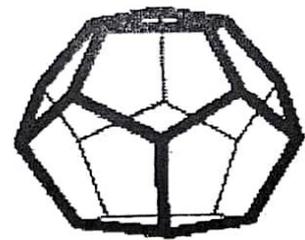
- يتشكل من جزئيات المركبات الهيدروكربونية الإيزوبارافينية (Isoparaffins) والألكانات الحلقية (Cycloalkanes) الأكبر من البنتان (Pentane) .
- يتألف من (34) جزيئة ماء و (6) جزئيات غاز ، لاحظ الشكل (3,10) .



الشكل (3.10)، جزيئة هيدرات من النوع (H)



الشكل (3.9)، جزيئة هيدرات من النوع (II)



الشكل (3.8)، جزيئة هيدرات من النوع (I)

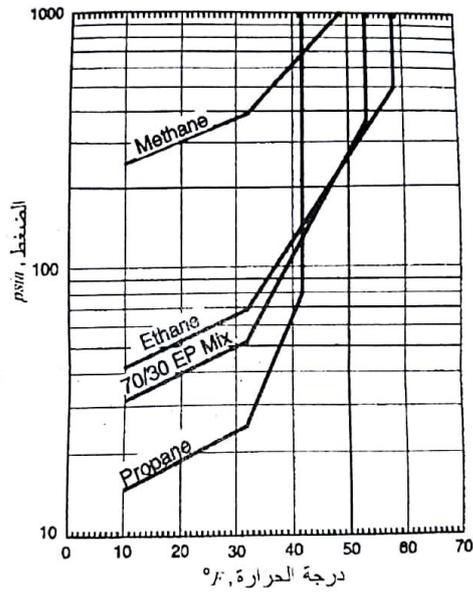
ومن الجدير بالذكر أن نوع الهيدرات المتشكلة يتحدد تبعاً للتركيب الكيميائي للغاز ، فقد اثبتت الملاحظات الحقلية أن أمزجة الغازات الطبيعية تشكل هيدرات من النوع (II) .

لا يؤثر نوع الهيدرات المتشكلة من وجهة النظر العملية على مظهرها أو خصائصها او المشاكل التي يمكن أن تسببها ولكنها ذات تأثير هام جداً على شروط تشكلها (الضغط و درجة الحرارة ، فوجود كميات قليلة جداً من (C_3H_8) و ($i-C_4H_{10}$) في المزيج تسبب انخفاض

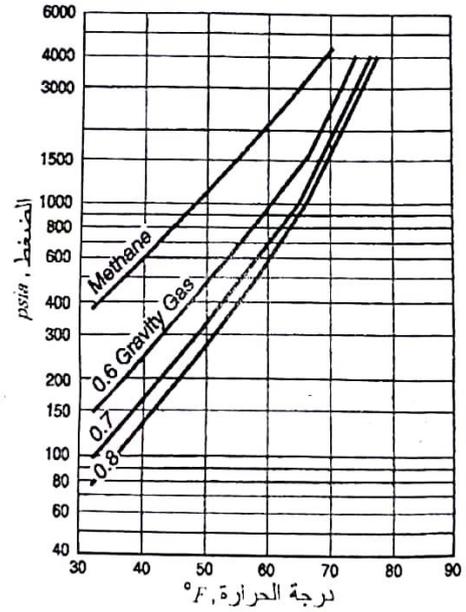
كبير في الضغوط المطلوبة لبدء تشكل الهيدرات وهذا ما يفسر لنا أن النوع (II) أكثر استقراراً

من

النوع I)



الشكل (3,12) تأثير الإيثان و البروبان على شروط تشكل الهيدرات



الشكل (3,11) تأثير الكثافة النسبية للغاز على شروط تشكل الهيدرات

يؤدي وجود غاز (H_2S) في المزيج الغازي إلى تحسين ظروف تشكل الهيدرات (زيادة استقرارية الهيدرات المتشكلة) حيث يعمل على رفع درجة حرارة تشكل الهيدرات وذلك عند قيمة معينة للضغط، في حين يكون لحضور غاز (CO_2) تأثير أقل فهو يخفض في أغلب الأحيان درجة حرارة تشكل الهيدرات وذلك عند قيمة ثابتة للضغط.

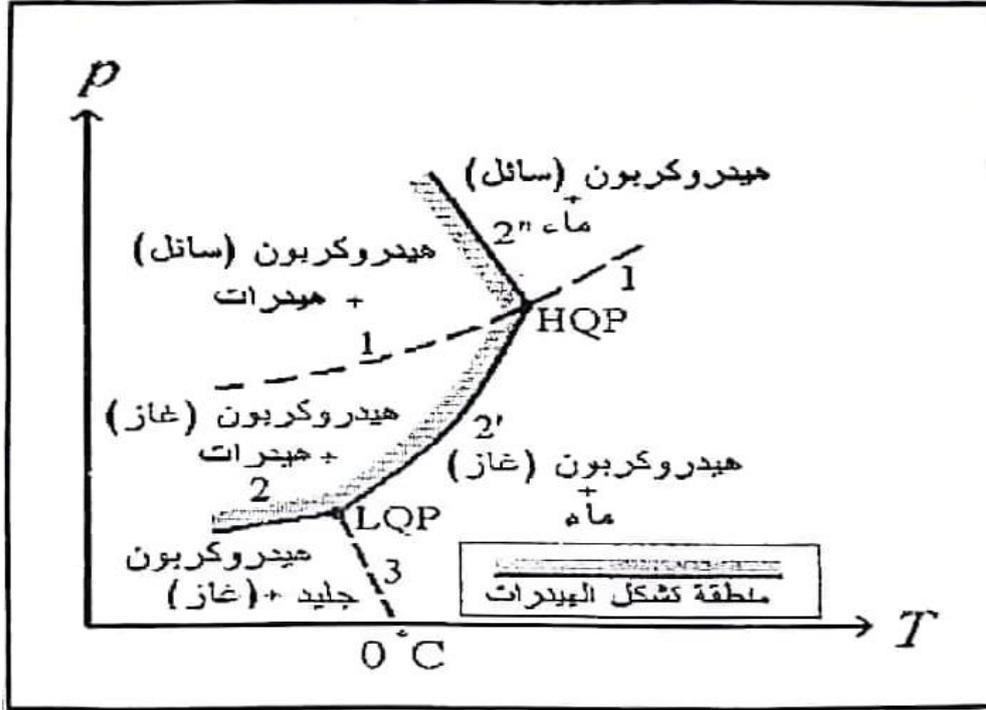
2-2-3 شروط تشكل الهيدرات :

تقسم الشروط التي تؤثر على عملية تشكل الهيدرات إلى ما يلي :

A. الشروط الرئيسية : و تتضمن أن يكون الغاز مشبعاً ببخار الماء (حالة التوازن) ، درجة الحرارة ، الضغط ، وتركيب الغاز .

B. الشروط الثانوية المساعدة : وتتضمن درجة المزج ، حركية الغاز ، اضطراب التدفق ، موقع تشكل نوى البلورات و تكتلها (أنواع الأنابيب ، صمامات ، أجهزة القياس الخ) ، وتركيز الأملاح في المياه المتواجدة في تماس مع الغاز .

من أجل فهم ظروف تشكل الهيدرات لا بد من دراسة المخطط الطوري (Phase Diagram) لمزيج الماء و المركبات الهيدروكربونية الخفيفة و النقية الشكل (3.13) .



الشكل (3,13) مخطط الهيدرات من المنحني الطوري للمزيج

(ماء - هيدروكربون خفيف نقي)

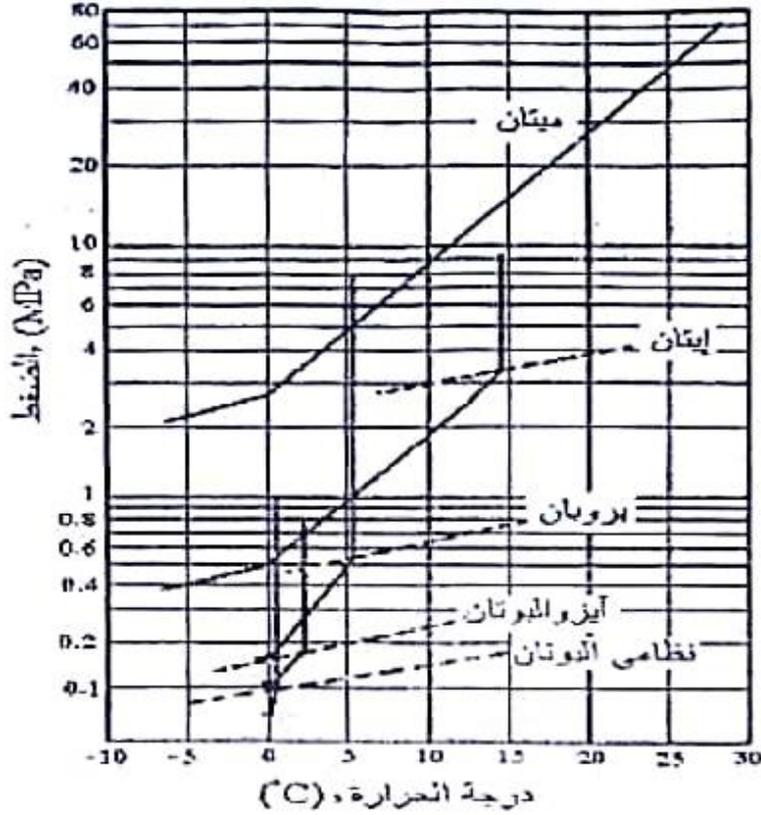
يمثل الخط (1) الضغط البخاري للمركب الهيدروكربوني النقي ، أما الخط (2،2'،2) فيمثل حدود منطقة تشكل الهيدرات ، في حين يوافق تغير اتجاه المنحني عند النقطة (LQP)

Low Quadruple point تغير الحالة الطورية للجليد في النقطة (LQP) يكون الجليد والماء السائل و الهيدروكربون الغازي والهيدرات في حالة توازن

يفصل الخط (2) المنطقة التي يوجد فيها الماء السائل و الهيدروكربون الغازي عن المنطقة التي يوجد فيها الهيدروكربون الغازي والهيدرات

يوافق تغير اتجاه المنحني عند النقطة (HQP) High quadruple point التغير الطوري للمركب الهيدروكربوني النقي ففي النقطة (HQP) يوجد أربعة أطوار في حالة توازن : الماء السائل ، الهيدروكربون السائل، الهيدروكربون الغازي و الهيدرات الصلبة .

في النقطة (HQP) لا يجوز تغيير درجة الحرارة أو الضغط أو تراكيب الجملة حتى لا يختفي أحد الأطوار فعند درجة حرارة أعلى من تلك الموجودة في النقطة (HQP) تعتبر النقطة الحرجة لتشكل الهيدرات ، ويمكن من الشكل (3.14) المعبر عن شروط تشكل هيدرات الميثان ، الإيثان ، البروبان ، البوتان قراءة قيمة هذه النقطة لكل مركب هيدروكربوني على حدا.



الشكل (3.14) ، منحنيات تشكل الهيدرات لمجموعة من الغازات

3-2-3 التنبؤ عن شروط تشكل هيدرات الغازات الطبيعية الحلوة:

لقد أثبتت طرق عديدة صلاحيتها في التنبؤ عن شروط تشكل هيدرات الغازات الحلوة أو تلك التي تحتوي على كميات قليلة جداً من الغازات الحامضية (CO_2) و/ أو ($H_2 S$) ، ولكن من أكثر هذه الطرق دقة وموثوقية تلك التي تعتمد على تحليل الغاز (GAS Analysis) ، يمكن أن نذكر من أهم الطرق طريقة كاتز (Kats Method) التي تستعمل ثوابت توازن

(بخار _ صلب) المعرفة كما يلي:

$$K_{vS} = \frac{y}{x_S} \quad (3.4)$$

حيث أن:

y: الكسر المولي للعنصر في الطور الغازي

x_S : الكسر المولي للعنصر في الطور الصلب (الهيدرات).

K_{vS} : ثابت التوازن (بخار_ صلب) ، ويمكن تحديد قيمته من خلال مجموعة من المنحنيات التي تربط بين كل من الضغط و درجة الحرارة وثابت التوازن للمركبات الملائمة لتشكل الهيدرات (ميتان _ إيثان _ بروبان _ أيزوبوتان _ نظامي البوتان _ غاز ثاني أوكسيد

الكربون _ غاز كبريت الهيدروجين) في حين يفترض أن لثابت توازن الجزيئات الأكبر من نظامي البوتان بالإضافة إلى غاز الأزوت قيمة في اللانهاية.

يتم تحديد شروط تشكل هيدرات الغازات الطبيعية الحلوة عملياً ، باستخدام ثوابت التوازن (بخار- صلب) كما يلي:

1. يتم إيجاد قيمة ثوابت التوازن لكل المركبات المشكلة للمزيج والملائمة لتشكل الهيدرات وذلك عند درجة حرارة وضغط محددين.

2. يقسم الكسر المولي لكل مركب على ثابت توازنه.

3. يتم تحديد قيمة المجموع $(\sum_{N=1}^n y/K_{vs})$ ، فإذا كان الناتج يساوي الواحد فإن الجملة

متوازنة ترموديناميكياً ، أما إذا كان الناتج أكبر من واحد فإن الظروف تكون مهيأة لتشكل الهيدرات ، وعندما يكون المجموع أقل من الواحد فإن الهيدرات لا يمكن أن تتشكل.

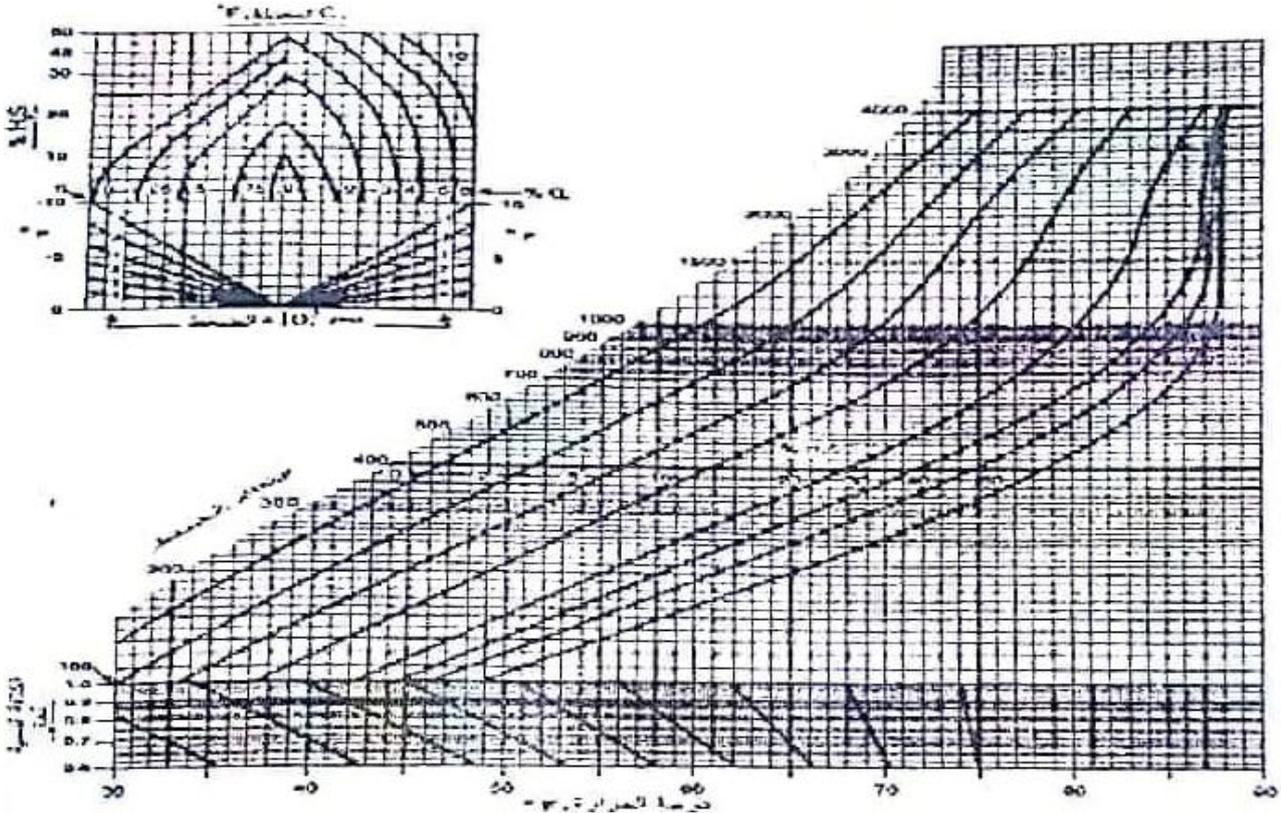
لا ينصح باستخدام طريقة (Kats) عند الضغوط التي تتجاوز (1000-1500 psia)، لذلك فإنه من المفضل في مثل هذه الحالة استخدام طرق أخرى.

3-2-4- التنبؤ عن شروط تشكل هيدرات الغازات الطبيعية الحاوية غازات حامضية:

لا يمكن الاعتماد على طريقة (Kats) في التنبؤ عن شروط تشكل الهيدرات في الغازات الطبيعية الحاوية على كميات لا يستهان بها من الغازات الحامضية بالرغم من أن قيم (K_{vs}) متوفرة لهذه المكونات ، حيث تتفاوت شروط تشكل هيدرات الغازات الطبيعية الحاوية على نسبة عالية من (CO_2) و $(H_2 S)$ بشكل ملحوظ وواضح عن تلك المؤلفة فقط من مركبات هيدروكربونية صرفة.

للتنبؤ عن درجة حرارة تشكل هيدرات الغازات الحاوية على نسبة عالية من $(H_2 S)$ تستخدم طريقة (Baile & Wichert) التي تستند على مبدأ تعديل شروط تشكل هيدرات البروبان وذلك نتيجة لوجود $(H_2 S)$.

في الوقت الراهن تعتبر برامج الحاسوب التي تبنى على أساس معادلة الحالة (EOS) من أكثر الطرق ثباتية في التنبؤ عن درجة حرارة تشكل الهيدرات ، حيث بلغت دقة هذه البرامج $(\pm 2^\circ F)$ عند مقارنتها مع المعطيات التجريبية وهذه الدقة كافية عموماً لإجراء عمليات التصميم المناسبة.



الشكل (3.15) ، مخطط التنبؤ عن هيدرات الغازات الحاوية على $(H_2 S)$.

3-3- طرق منع تشكل الهيدرات في أنظمة الغاز الطبيعي:

هناك أربع طرق لمنع تشكل الهيدرات في أنظمة الغاز الطبيعي وهي:

- 1) المحافظة على درجة حرارة النظام الغازي بحيث تبقى أعلى من درجة حرارة تشكل الهيدرات وذلك عند ضغط معين
- 2) المحافظة على بقاء ضغط النظام الغازي ما دون ضغط التوازن اللازم لتشكل الهيدرات وذلك عند درجة حرارة معينة
- 3) تخفيض نقطة ندى بخار الماء المتواجد في الغاز ، أو بمعنى آخر التقليل من محتوى رطوبة الغاز الطبيعي.
- 4) إضافة موانع تشكل الهيدرات (ميثانول _ غليكول....) إلى مجرى التيار الغازي .

وسيتم شرح الطريقتين الثالثة والرابعة بالتفصيل.

3-3-1 موانع تشكل الهيدرات (Hydrate Inhibition):

تعتمد هذه الطريقة بشكل رئيسي على حقن إحدى مواد الغليكول (Glycols) أو الميثانول (methanol) في مجرى التيار الغازي بحيث يمكن لهذه المواد أن تتحد مع الطور المائي المتكاثف (condensed Aqueous phase) مشكلة محلول مائي لا يتجمد إلا عند درجات حرارة منخفضة جداً (تحت درجة الصفر بكثير) ، وبعد ذلك يتم فصل مزيج (المياه المتكاثفة وموانع تشكل الهيدرات) مع تيار المركبات الهيدروكربونية عن التيار الغازي.

يمثل استخدام مواد الغليكول محاسن عديدة من وجهة النظر الاقتصادية مقارنة مع الميثانول المعاد تنشيطه بالتقطير ، ولكن بالمقابل يفضل استخدام الميثانول عملياً في الوحدات العاملة في شروط درجات الحرارة المنخفضة جداً (Cryogenic Conditions).

من أهم مواد الغليكول المستخدمة كموانع تشكل الهيدرات يمكن أن نذكر:

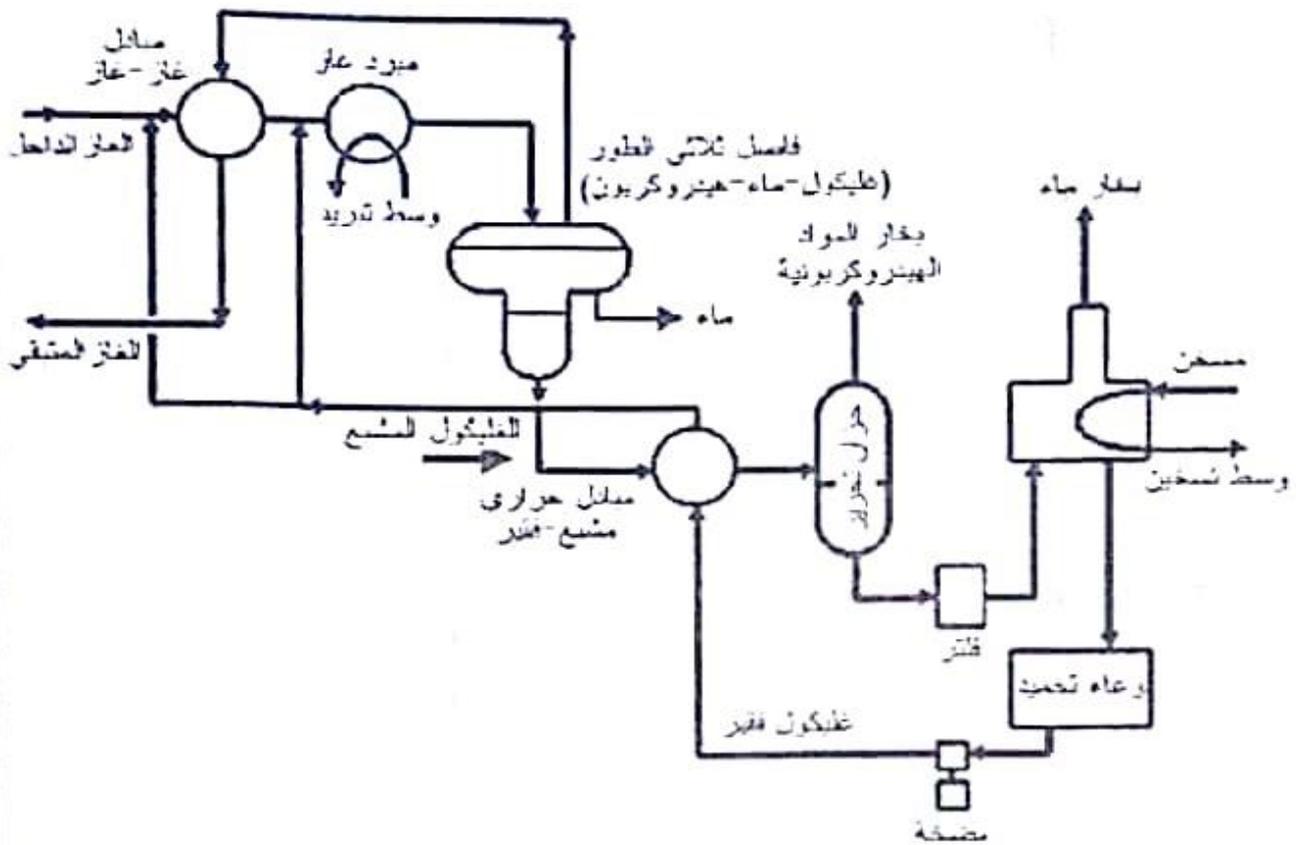
ثنائي ايتيلين الغليكول (DEG) ثلاثي ايتيلين الغليكول (TEG) وايتيلين الغليكول (EG) الذي يعتبر الأكثر استخداماً من وجهة النظر العملية بسبب كلفته الرخيصة ولزوجته المنخفضة وانحلاليته القليلة في المركبات الهيدروكربونية السائلة، يوضح الجدول التالي الخصائص الفيزيائية لمركبات الغليكول والميثانول.

	Ethylene Glycol	Diethylene Glycol	Triethylene Glycol	Tetraethylene Glycol	Methanol
Formula	C ₂ H ₆ O ₂	C ₁₀ H ₁₄ O ₄	C ₆ H ₁₄ O ₄	C ₆ H ₁₈ O ₅	CH ₃ OH
Malleolar Weight	62.1	106.1	152.2	194.2	32.04
Bulling part at 760mm Hg. °F	387.1	472.6	545.9	597.2	148.1
Bulling part at mm Hg. °C760	197.3	244.6	285.5	314	64.5
Vapour Pressure at 77 °F (25 °C)mmHg	0.12	0.01	0.01	0.01	120
Density Gr at 77 °F (25 °C)	1.110	1.113	1.119	1.120	0.790
Gr at 140 °F (25 °C)	1.085	1.088	1.092	1.092	
Pounds per Gallon at 77 °F (25 °C)	9.26	9.29	9.34	9.34	6.59
Freezing point °F	8	17	19	22	144.0-
Pour point °F	-	-65	-73	-42	
Viscously in centdse at 77 °F (25 °C)	16.5	28.2	37.3	44.6	0.52
at 140 °F (25 °C)	4.68	6.99	8.77	10.2	

Surface tensim at 77°F (25°C)	47	44	45	45	22.5
Refractive index at 77°F (25°C)	1.430	1.446	1.454		0.328
Spedfic Heat at 77°F (25°C)	0.58	0.55	0.53		0.60
Flash point °F	240	255	350	400	53.6
Fire point °F	245	290	330	375	

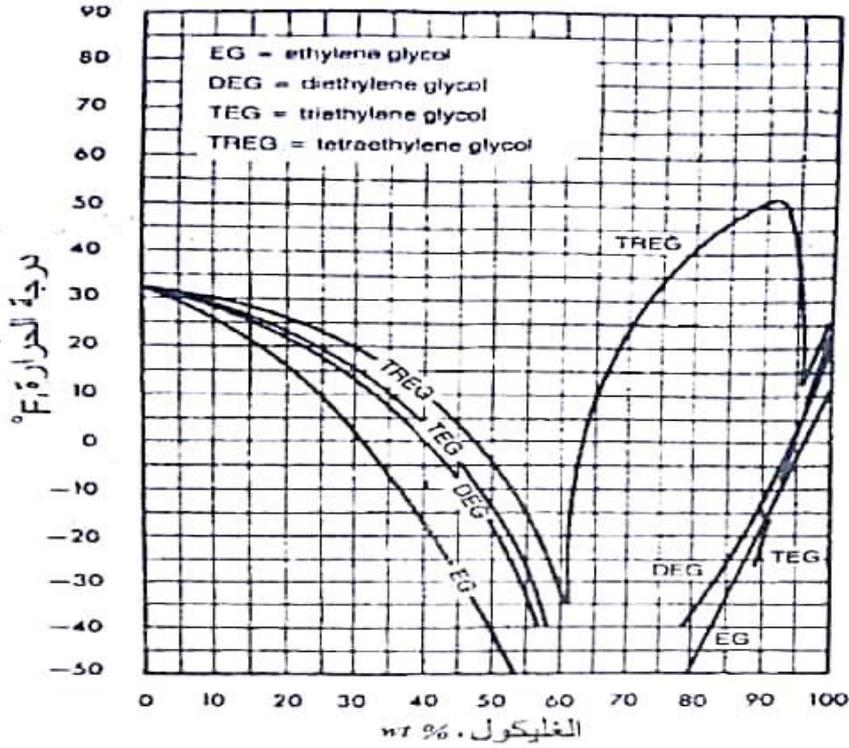
الجدول (3.2) ، الخصائص الفيزيائية لمركبات الغليكول والميتانول.

ومن المهم جدا أن نعرف أن الفعالية القصوى لموانع تشكل الهيدرات تكمن عندما يتم استخدامها في نفس النقطة التي تنخفض فيها درجة حرارة الغاز الرطب إلى درجة حرارة تشكل الهيدرات.



الشكل (3.16) المخطط التكنولوجي لأنظمة حقن (TEG) في وحدات التبريد (Refrigeration plants).

يجب أن تتمتع أجهزة إعادة التنشيط المستخدمة في أنظمة حقن الغليكول بقدرة على إنتاج محاليل غليكول منشطة ذات نقاط تجمد (Freezing point) أخفض من أخفض درجة حرارة يمكن أن تصادف في نظام الحقن، يوضح الشكل (3.17). نقاط تجمد محاليل الغليكول المائية ذات التراكيز المختلفة.



الشكل (3.17) يبين نقاط تجمد محاليل الغليكول المائية.

يتم تعيين التركيز الأصغري لمانع تشكل الهيدرات في المحلول المائي باستخدام

(Hammer Schmidt's equation) التالية:

حيث أن :

$$d = \frac{2335 X_1}{M_1 (1 - X_1)} \quad (3 - 5)$$

d : قيمة انخفاض نقطة ندى الماء (°F)

M_1 : الكتلة المولية الجزئية لمانع تشكل الهيدرات .

X_1 : الكسر الكتلي للمانع في الطور السائل .

ومن الجدير بالذكر أن المعادلة السابقة لا يمكن تطبيقها من أجل تراكيز الميثانول الاعلى من (20-25%wt) للميثانول أو تراكيز الغليكول الاكبر من (60-70 wt) ، ولكن لتعيين تراكيز الميثانول الاكبر من القيم المذكورة أعلاه (تقريباً حتى 50%) يمكن استعمال معادلة (Nielsen-Bucklin):

$$d = -129.61n (X_{H_2O}) \quad (3.6)$$

حيث أن :

X_{H_2O} الكسر المولي للماء في الطور السائل .

بعد أن يصبح تركيز مانع تشكل الهيدرات معلوماً يتم حساب كتلة المانع في الطور السائل من المعادلة التالية:

$$m_1 = \frac{X_1 \cdot m_{H_2O}}{X_L - X_I} \quad (3.7)$$

حيث أن:

m_1 : كتلة المانع المطلوبة يومياً lb/day

m_{H_2O} : كتلة الماء المتكاثف يومياً lb/day

X_L : تركيز المانع النقي والمحقوق في التيار، ويفترض في معظم الأحيان (100%).

ويجب التنويه إلى أن كمية المانع المستخدمة يجب أن تكون كافية ليس فقط لمنع تجمد المزيج (مانع- ماء) وإنما لتعويض الكمية المتبخرة منه والمنحلة في المركبات الهيدروكربونية السائلة. حيث يتمتع الميثانول بضغط بخاري عالي بشكل كاف لتبخر كميات معتبرة منه، في حين أن كمية الغليكول المفقودة بالبخر فهي قليلة جداً بحيث يمكن اهمالها عملياً.

كما أنه من الصعب جداً التنبؤ عن كمية المانع المفقودة نتيجة لانحلاله في المركبات الهيدروكربونية السائلة حيث تعتمد هذه الانحلالية بشكل رئيسي على تركيب كل من الماء والمركبات الهيدروكربونية، فمثلاً درجة انحلال الميثانول في المركبات الهيدروكربونية النفثينية (Naphthenic Hydrocarbons) أقل منها بشكل ملحوظ عما هي عليه في البرافينات (paraffin) ولكن انحلاليته في المركبات الهيدروكربونية العطرية (Aromatic Hydrocarbons) أكبر من (4- 6) مرات عما هي عليه في البرافينات، في حين أن انحلالية (EG) في المركبات الهيدروكربونية السائلة قليلة جداً.

3-3-2 تجفيف الغاز (Gas Dehydration) :

تستعمل هذه الطريقة عند معالجة كميات كبيرة من الغاز كما أنه لا يمكن تطبيقها على فوهات الآبار العاملة وإنما قبل دخول الغاز إلى خط الأنابيب الرئيسي

يتم تنفيذ هذه الطريقة إما باستخدام المجففات السائلة (Desiccants liquid) أو الصلبة (Solid Desiccants)، ويفضل من وجهة النظر الاقتصادية استخدام المجففات السائلة للأسباب التالية:

1. إمكانية الحصول على غازات مجففة بمواصفات تجارية ممتازة.
2. تتطلب استخدام أجهزة سهلة التشغيل والصيانة بالإضافة إلى إمكانية أتمتة هذه الأجهزة
3. إمكانية استخدامها في حال احتواء الغازات الطبيعية على نسبة كبيرة من الغازات الحامضية مع الأخذ بعين الاعتبار بعض الإجراءات الوقائية أثناء تصميم أجهزة التجفيف المعتبرة وذلك نتيجة لقابلية انحلال هذه الغازات الحامضية في المجففات السائلة .

3-3-2-1 التجفيف باستخدام الغليكول (Glycol Dehydration):

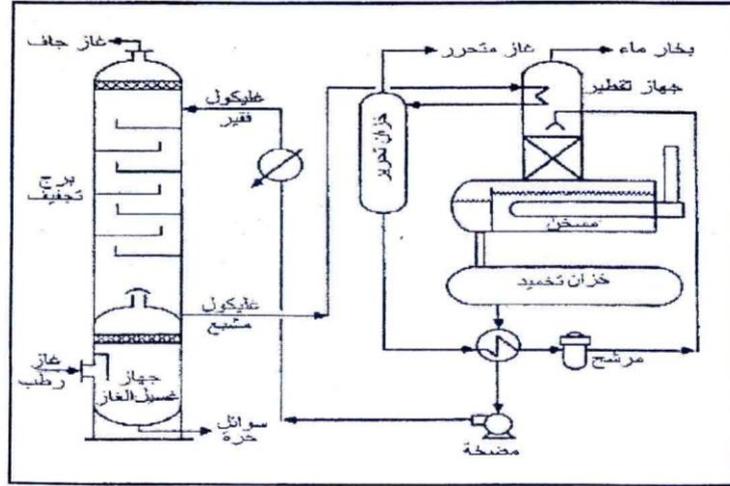
يستخدم الغليكول (Glycol) في الحالات التي يراد فيها تخفيض نقطة الندى لبخار الماء في الغازات الطبيعية بين (60-120°F) ، ومن أهم أنواع الغليكول المستخدمة كمجففات سائلة يمكن أن نذكر :

- ثنائي إيثيلين الغليكول (DEG) ، (Diethylene glycol).
 - ثلاثي إيثيلين الغليكول (TEG) ، (Triethylene Glycol) ويعتبر عملياً من أكثر محاليل الغليكول انتشاراً واستخداماً في عملية تجفيف الغازات الطبيعية.
 - رباعي إيثيلين الغليكول (TREG) (Tetraethylene Glycol).
- لقد أثبتت التطبيقات الحقلية أن تزويد أنظمة التجفيف بأجهزة غسيل للغاز الداخل (Inlet Gas Scrubber) تعتبر من أولويات عمليات التصميم حتى ولو كان المجفف يقع بالقرب من أجهزة الفصل الرئيسية، حيث تتجلى الوظيفة الرئيسية لأجهزة الغسيل للغاز في إزالة كميات كبيرة من المياه (العذبة أو المالحة) والمركبات الهيدروكربونية السائلة و المواد الكيميائية المستخدمة في عمليات المعالجة وموانع التآكل ومنعها من الوصول إلى أبراج التجفيف، إذ يمكن أن يؤدي وجود كميات صغيرة من هذه المواد إلى فقدان كميات كبيرة من الغليكول المستخدم وذلك نتيجة لتشكل الرغوة الأمر الذي يترتب عليه زيادة ملموسة في عمليات الصيانة وبالتالي انخفاض واضح في كفاءة عملية التجفيف، ومن الجدير بالذكر أن الفواصل التكاملية (Integral Separators) المركبة في أسفل أبراج التجفيف من أكثر الفواصل شيوعاً في الصناعة الغازية.

❖ المخطط التكنولوجي لعملية التجفيف باستخدام (TEG):

يتم ضخ الغليكول المعاد تنشيطه (Regenerated Glycol) إلى الصينية العليا (Top tray) من برج الامتصاص أو التجفيف (Contactor) ، حيث يقوم الغليكول المتدفق من أعلى برج الإمتصاص إلى أسفله بامتصاص الماء الموجود في الغاز الطبيعي الرطب والمتدفق من أسفل البرج إلى أعلاه، وبعد ذلك يتم سحب الغليكول المشبع بالماء من أسفل برج الامتصاص وإرساله إلى جهاز تكثيف مرجع (Reflux Condenser) ومنه إلى خزان تحرير (Flash Tank) مهمته الأساسية إزالة جميع الغازات المنحلة في محلول الغليكول

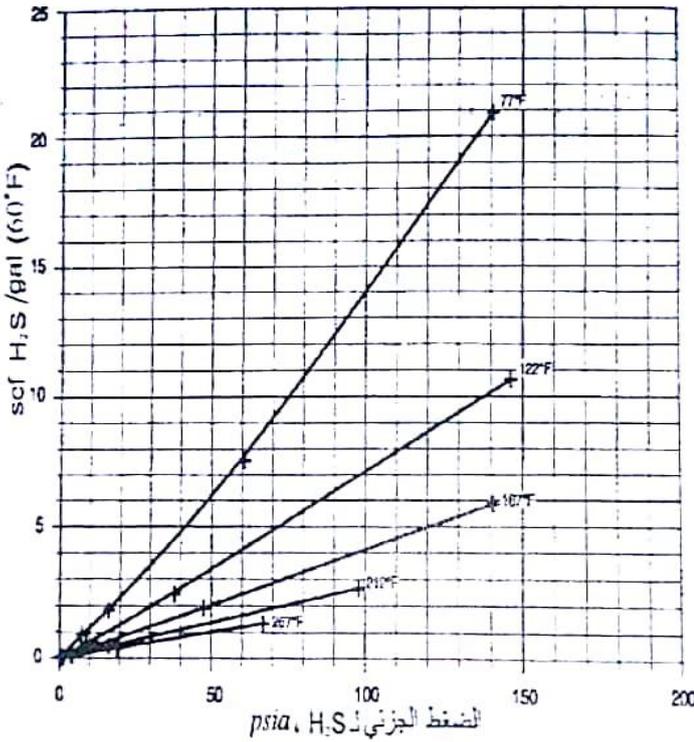
المشبع فيما بعد يتابع هذا المحلول المشبع طريقه إلى أجهزة إعادة التنشيط (Regenerator) مراراً من خلال مبادل حراري وبعد ذلك يتدفق الغليكول الفقير والمعاد تنشيطه من خلال مبادل حراري (Laen- rich Heat exchanger) حيث يتم تبريده قبل أن يعاد تدويره من جديد إلى برج الامتصاص.



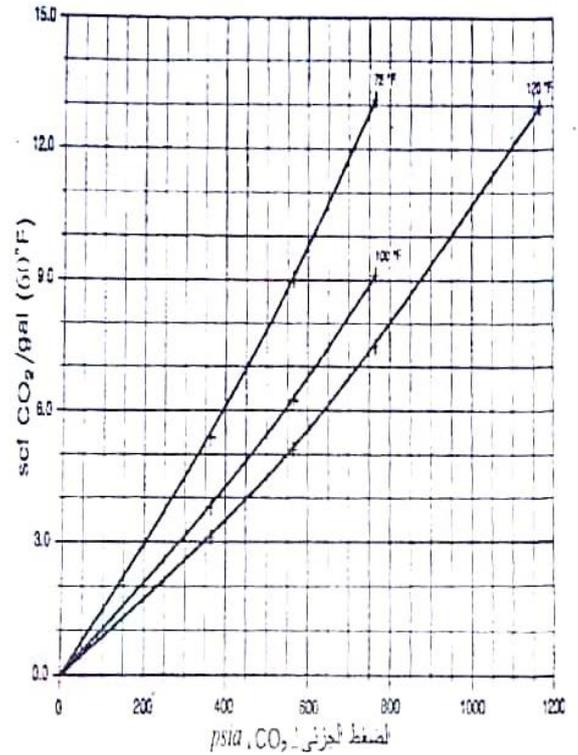
الشكل 3.18 المخطط التكنولوجي لعملية تجفيف الغاز الطبيعي باستخدام محاليل الغليكول

*انحلال المركبات الهيدروكربونية في (TEG) :

ينحل عملياً (1scf) من الغاز الحلو في (1galon TEG) عند الضغط (1000psia) ودرجة الحرارة (100°F) ويزداد هذا الانحلال بازدياد كمية الغازات الحامضية المتواجدة في الغاز الطبيعي، حيث يبين الشكل (3.19) انحلالية غاز ثنائي H ووكسيد الكربون النقي في محلول (TEG) ذو التركيز (wt%TEG) (96.5) في حين يبين الشكل (3.20) انحلالية غاز كبريت الهيدروجين النقي في (TEG) النقي.



الشكل (3.20)، انحلالية غاز (H₂S) في (TEG) النقي.



الشكل (3.19)، انحلالية غاز (CO₂) في محلول (TEG)

ومن الجدير بالذكر أن المركبات الهيدروكربونية البرافينية هي مركبات عديمة الانحلال في (TEG) في حين تمتاز المركبات العطرية بدرجة انحلالية عالية جداً، لدرجة أن كميات كبيرة منها يمكن أن تنحل في (TEG) عند شروط برج التجفيف تزداد درجة انحلالية المركبات العطرية عملياً بازدياد الضغط ومعدل دوران (TEG). وبانخفاض درجة الحرارة كما أن درجة الانحلالية هذه لا تعتمد أبداً على عدد التلامسات التي تحصل في برج التجفيف. كما يجب أن يكون قياس خزانات التحرير كاف بشكل مناسب وذلك لتحرير الغازات المنحلة في (TEG) من جهة وللتخلص من المركبات الهيدروكربونية المرافقة من جهة أخرى، لذلك من الضروري جداً تأمين زمن احتفاظ أصغري (Retention Time Minimum) لتحقيق ذلك، لقد أثبتت الملاحظات الحقلية أن زمن الإحتفاظ الأصغري اللازم لتحرير الغازات المنحلة يتراوح بين (3-5min)

في حين يتراوح هذا الزمن بين (20-30 min) وذلك عندما يراد التخلص من المركبات الهيدروكربونية السائلة كما يجب أن لا يتجاوز الضغط في هذه الأوعية (75psia)

2-2-3-3 التجفيف باستخدام المجففات الصلبة (Solid Desiccant Dehydration) :
تعتمد عملية التجفيف في هذه الحالة على الاستفادة من خاصية الامتزاز (الادمصاص) لبعض المواد في انتزاع الماء من المركبات الهيدروكربونية الخفيفة ومن ثم طرحه عند درجات

حرارة مرتفعة أي أثناء تنشيط مادة الادمصاص وبشكل عام يجب أن تحقق مادة الادمصاص الميزات التالية :

1. أن تكون المادة المستعملة عالية الادمصاص للماء الأمر الذي يؤدي إلى الحصول على غاز جاف بشكل كاف.
2. أن تكون المادة خاملة كيميائياً بحيث لا تتفاعل مع مركبات الغاز المعالج.
3. أن تكون المادة غير قابلة للتفتت وتشكيل غبار. أن تكون المادة سهلة الاسترجاع.
4. ألا تتمتع المادة بمقاومة عالية لجريان الغاز. وتعرف في الوقت الراهن عدة مواد صلبة تتميز بأغلب الصفات المذكورة أعلاه مثل :

1- السيليكا جل : (Silica Gel) يستعمل بشكل رئيسي بهدف تجفيف الغازات الطبيعية وسوائلها، وإضافة إلى ذلك يمكن أن يستعمل بغية استرداد المركبات الهيدروكربونية (iC_{5+}) من الغاز الطبيعي وذلك في وحدات (HRUs) ويمكن للسيليكا جل أن تؤمن عملياً تحقيق نقاط ندى تتراوح بين ($-80^{\circ}F \div -70$)

2- البوكسيت (AL_2O_3):

يستعمل كالسيليكا جل في تخليص الغازات الطبيعية وسوائلها من الرطوبة، وله القدرة على تخفيض نقطة ندى بخار الماء المتواجد في التيار الغازي المعالج إلى ($-100^{\circ}F$) ، ومن محاسنه أن كمية الحرارة اللازمة لتنشيطه أقل من تلك اللازمة لتنشيط المناخل الجزيئية.

3- المناخل الجزيئية (Molecular Sieves) :

تمتاز بقدرة أكبر على امتزاز جزيئات الماء من تلك التي تتمتع بها المادتين السابقتين الأمر الذي يزيد من إمكانية الحصول على نقاط ندى منخفضة جداً، وتستعمل في أغلب الأحيان لتجفيف الغازات الطبيعية قبل دخولها في وحدات استرداد سوائل الغازات الطبيعية (NGL Recovery plants) العاملة عند درجات حرارة منخفضة جداً، ومن المهم الإشارة إلى أن نقطة ندى الماء في التيار الغازي الخارج والمعالج باستخدام المناخل الجزيئية يمكن أن تصل إلى ($-150^{\circ}F$) ، ولكن عندما يراد الحصول على نقاط ندى أخفض من ($-150^{\circ}F$) فيتم اللجوء إلى استخدام تصاميم خاصة (Special Designs) وتطبيق بارامترات تشغيل قاسية (Strict Operating Parametters)

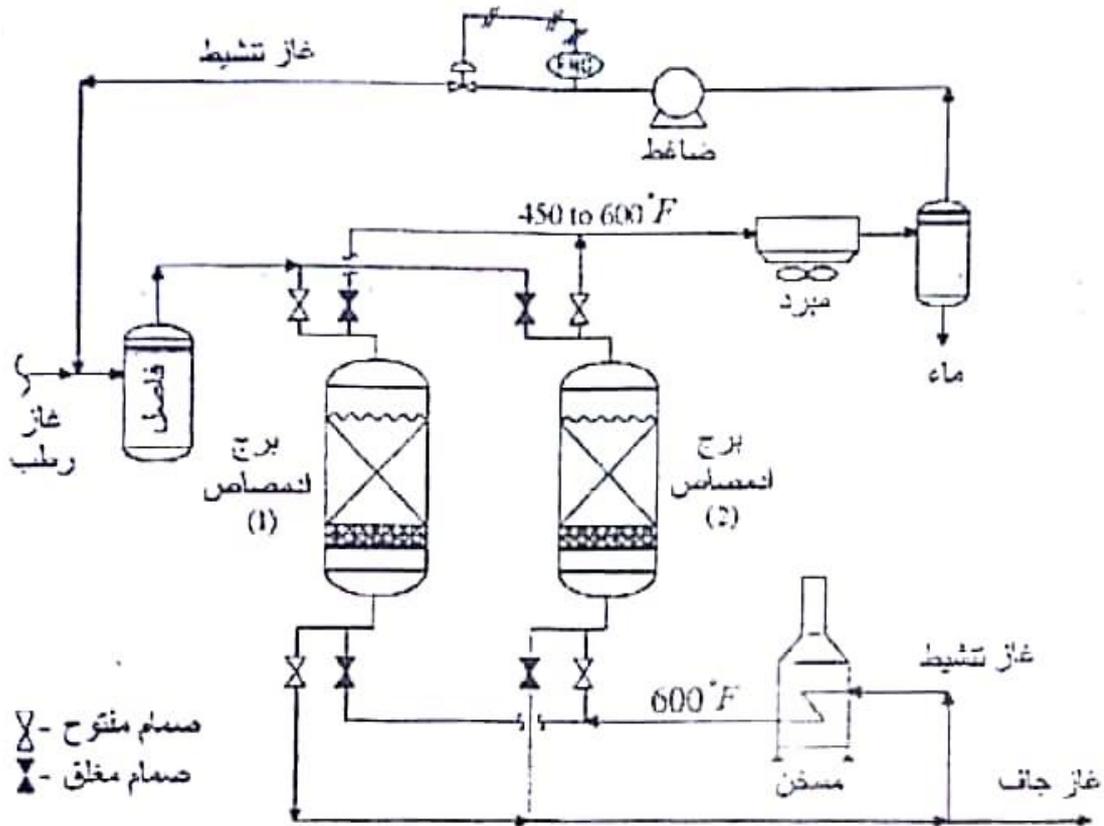
اسم المجفف	المظهر Lb/F ₃	الكثافة	قياس الحرارة	الحرارة النوعية (KJ/Kg.K)	الرطوبة في التيار الغازي الخارج (ppmw)
Alumina Gel Alcoa H 151	كروي	52	1/4"	0.48	5-10
Activated Alcoa F	حبيبي	52	1/4"- 8 mesh	-	0.1
Silica Gel Sorbead - R	كروي	49	4-8 mesh	1.05	5-10

5-10	1.05	3-8 mesh	45	كروي	Silica Gel Sorbead - H
0.1	1.00	4-8 mesh or 8-12 Mesh	-45 42	كروي	Mole Sieve Davison A4
0.1	1.00	1/8" Or 1/16"	-44 40	أسطواني	Mole Sieve Linde A4

الجدول (3.3) يبين أهم الخصائص لبعض المجففات الصلبة التجارية

تستخدم المجففات الصلبة المذكورة سابقا بشكل عام في أنظمة تجفيف

(Dehydration Systems) مؤلفة من برجين بالإضافة إلى تجهيزات التنشيط المرافقة (Associated Regeneration Equipment) يبين الشكل (3.21) المخطط التكنولوجي عملية تجفيف الغاز الطبيعي باستخدام المجففات الصلبة.



شكل (3.21) المخطط التكنولوجي عملية تجفيف الغاز الطبيعي باستخدام المجففات الصلبة.

تتلخص آلية سير عملية تجفيف الغاز الطبيعي باستخدام المجففات الصلبة على النحو التالي :
يمرر الغاز الرطب إلى برج الادمصاص (1) الذي يحوي طبقة من حبيبات المادة حيث يجتاز
الغاز طبقة مادة الادمصاص من الأسفل إلى الأعلى بعد استعمال المادة فترة من الزمن (hours 8_24)
يحوّل الغاز إلى برج الادمصاص (2) وتجرى عملية تنشيط مادة الادمصاص
في البرج الأول حيث يسخن قسم من الغاز الناتج عن برج الادمصاص إلى درجة الحرارة
(600) ويرسل إلى جهاز الادمصاص المطلوب تنشيطه، أما الغازات الناتجة عن التنشيط فيتم
تبريدها بواسطة مبرد خاص حيث ينفصل الماء عن الغاز وتستغرق فترة التنشيط من 8 _
(7-8 hours)

الفصل الرابع

التصميم التكنولوجي لوحدة التجفيف

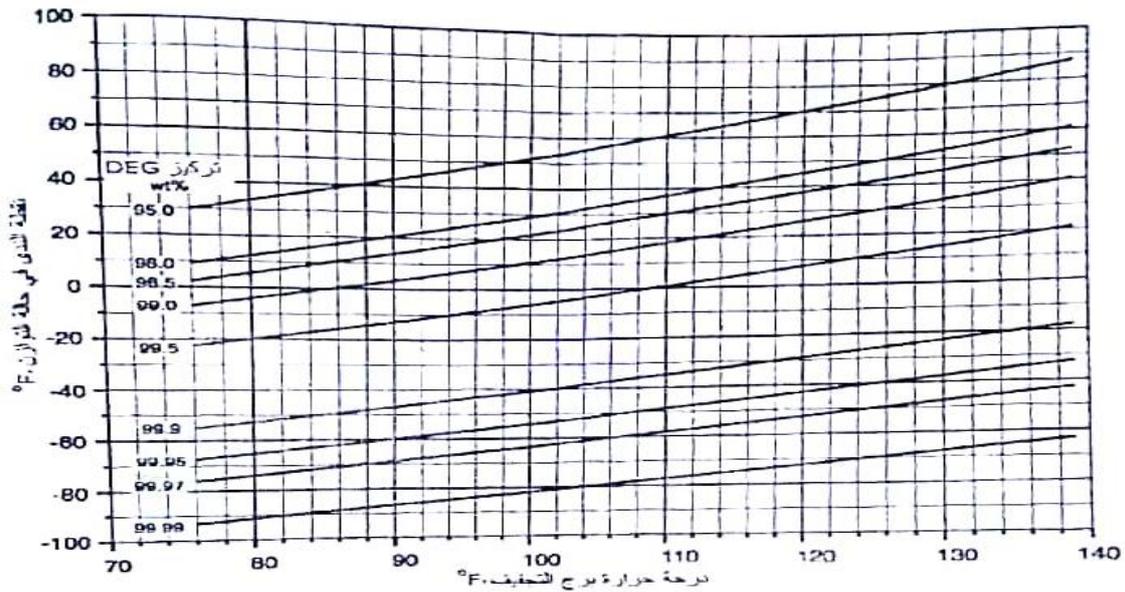
مقدمة:

تهدف عمليات التصميم التكنولوجية لأنظمة التجفيف بشكل رئيسي إلى تحديد التركيز الأصغري ل (TEG) المستخدم ومعدل دورانه وأبعاد برج التجفيف المستخدم (طول- قطر - عدد صواني)

1-4 تصميم أنظمة تجفيف الغاز الطبيعي باستخدام (TEG) :

تعتمد نقطة الندى الفعلية للماء في التيار الغازي المجفف على التركيز الأصغري لمحلول (TEG) وعلى معدل الدوران (Circulation Rate) لمحلول (TEG) وعلى عدد مراحل التوازن (Equilibrium stages) .

إذاً تتضمن عملية تصميم أنظمة تجفيف الغازات الطبيعية باستخدام (TEG) أولاً تعيين التركيز الأصغري لمحلول (TEG) وذلك بغية الحصول على نقطة الندى المطلوبة للماء في التيار الغازي الخارج، يبين الشكل (4.1) نقطة الندى للماء المتواجدة في التيار الغازي الموجود في حالة توازن مع محلول (TEG) عند درجات حرارة وتراكيز مختلفة ل (TEG) .

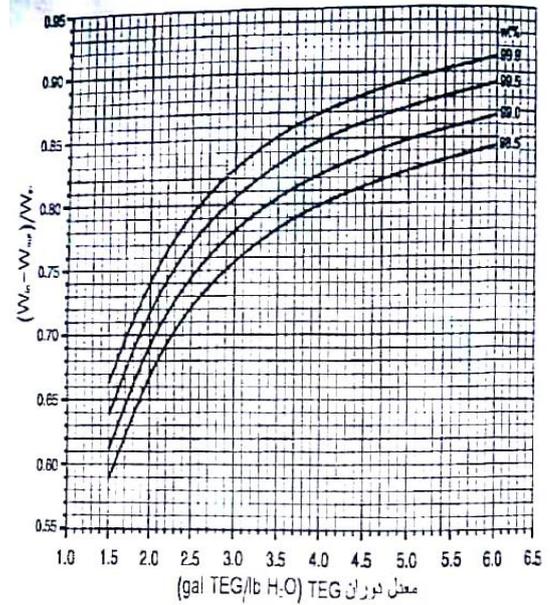
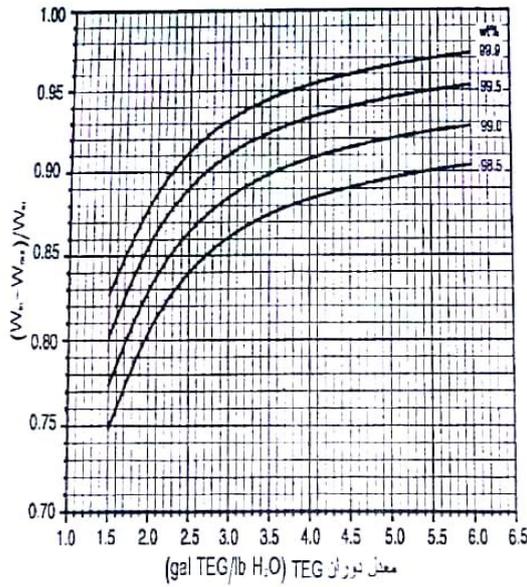


الشكل (4.1) نقطة الندى للماء المتواجد في التيار الغازي عند درجات حرارة مختلفة لبرج التجفيف وتراكيز مختلفة ل (TEG)

يمكن أن يستعمل الشكل (4.1) لتقدير تركيز (TEG) المطلوب أو لتعيين الإنخفاض النظري لنقطة الندى وذلك من أجل تركيز معطى ل (TEG) ودرجات حرارة معطاة لبرج التجفيف، و من الجدير بالذكر أن نقطة الندى الفعلية لا تعتمد على الضغط، لذا يمكن استخدام الشكل (4.1) من أجل ضغوط تتجاوز (1500psia) بنسبة ارتياب صغيرة جداً. فبعد أن يتم تحديد التركيز الأصغري ل (TEG) لا بد من تعيين معدل دوران (TEG) وعدد الصواني أو ارتفاع الحشوة

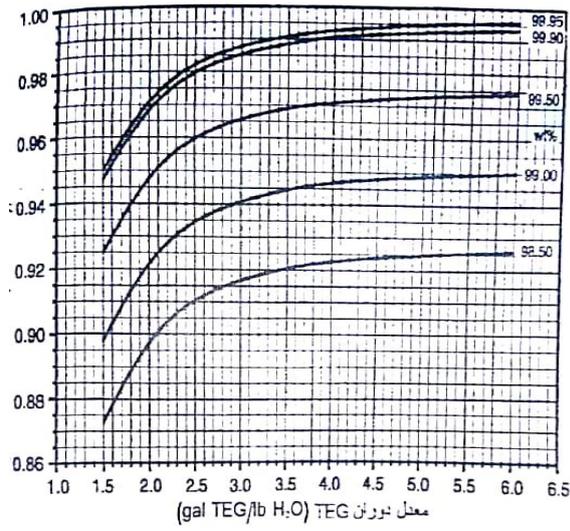
في برج التجفيف (الإمتصاص)، حيث تتراوح معدلات دوران (TEG) المستخدمة في التصاميم الأكثر اقتصادية بين ($2 - 5_{gal/lbH_2O}$ absorbed)

وتستخدم من أجل ايجاد العلاقة بين معدل دوران وعدد مراحل التوازن تقنية حساب الإمتصاص (Absorption Calculaction Techniques) الممثلة نتائجها من أجل أنظمة (TEG) بالأشكال (4.2)،(4.3)،(4.4)،(4.5)،(4.6)

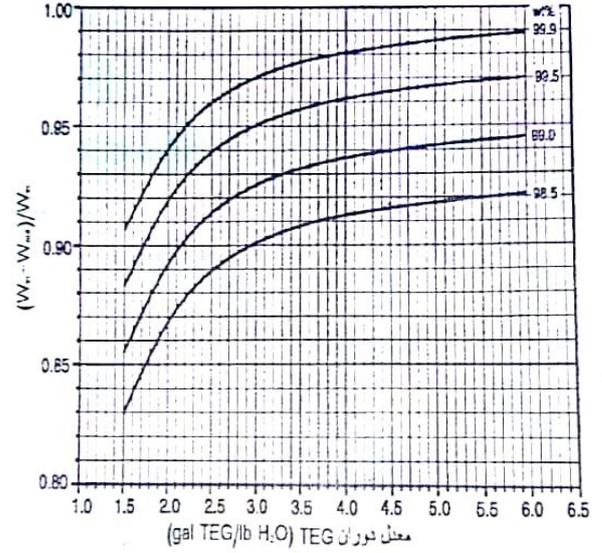


الشكل (4.3) يبين العلاقة بين كمية الماء المزالة ومعدل دوران (TEG) وذلك من أجل (N=1.5)

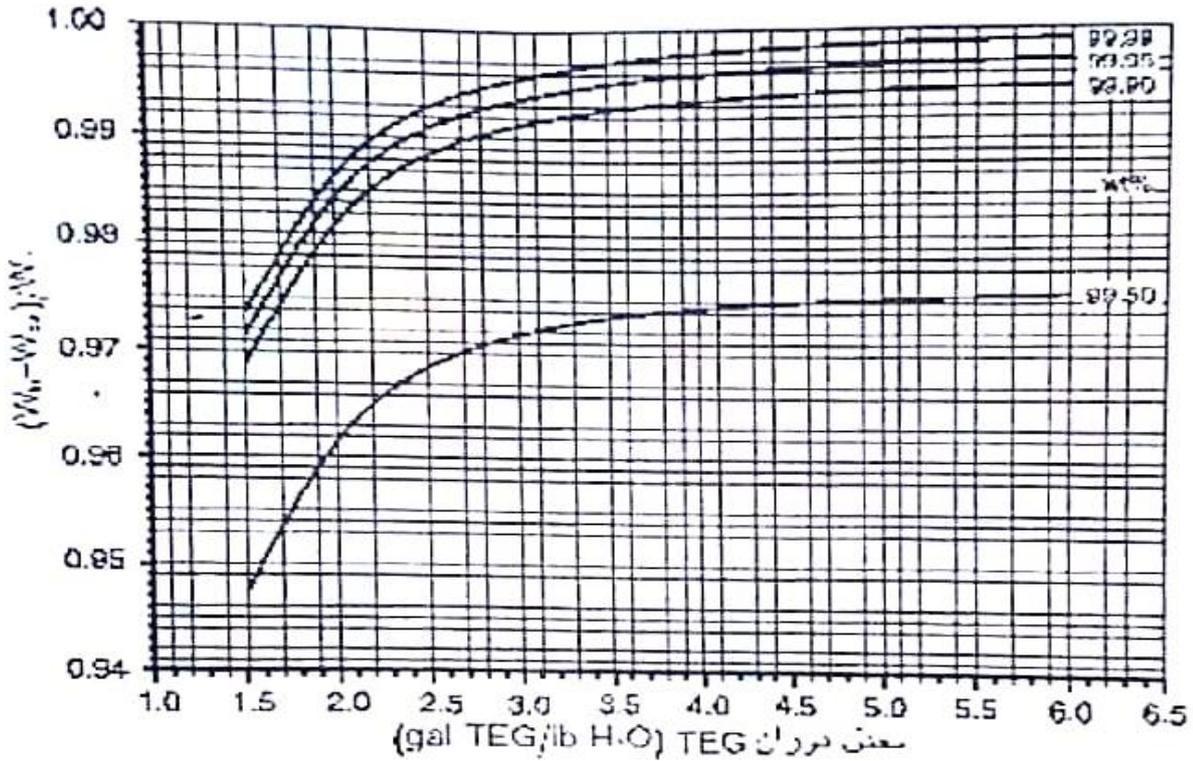
الشكل (4.2) يبين العلاقة بين كمية الماء المزالة ومعدل دوران (TEG) وذلك من أجل مرحلة توازن واحدة (N=1)



الشكل (4.5) يبين العلاقة بين كمية الماء المزالة ومعدل دوران (TEG) وذلك من أجل (N=2.5)



الشكل (4.4) يبين العلاقة بين كمية الماء المزالة ومعدل دوران (TEG) وذلك من أجل (N=2)



الشكل (4.6) يبين العلاقة بين كمية الماء المزالة ومعدل دوران (TEG) وذلك من أجل (N=3)

بغية الانتقال من عدد مراحل التوازن إلى العدد الفعلي لصواني برج التجفيف يفترض أن الكفاءة الكلية للصينية تتراوح بين (25_30%) في حين يعتمد ارتفاع الحشوة

(Height of packing) على معدل دوران (TEG) ومعدل تدفق الغاز (Gas Rate) وكثافة الغاز (Gas Density) ولكن عادة حشوة بارتفاع (60) يمكن أن تكون كافية لتحقيق الغرض المطلوب.

ويجب الانتباه إلى أنه عندما لا تتجاوز درجة حرارة برج التجفيف (60°F) يمكن أن تخفض اللزوجة المتزايدة ل (TEG) من كفاءة انتقال المادة (Mass Transfer Efficiency) لذلك لابد من تجنب درجات الحرارة في هذا المجال.

يبلغ التباعد المثالي بين صينيتين متتاليتين في برج التجفيف (24") وبناء على ذلك يعتمد الارتفاع الكلي لبرج التجفيف بشكل رئيسي على عدد الصواني أو ارتفاع الحشوة مضافا إليها (6-10 ft) وذلك لتأمين فراغ يسمح بتحرير البخار فوق الصينية العليا من جهة ومن جهة أخرى لتوزيع تيار الغاز الداخل بشكل منتظم تحت الصينية السفلية، واندفاع الغليكول المشبع بالماء إلى أسفل برج التجفيف.

تعتبر صواني فناجين الفقاقيع (Bubble Cap Trays) من أشهر أنواع الصواني المستخدمة في أبراج التجفيف، في حين يسمح استخدام الحشوة الانشائية (Structured packing) باستعمال أبراج تجفيف ذات أقطار أصغر وارتفاع أقل.

إن طرق تصميم أبراج التجفيف تشبه إلى حد كبير تلك المستخدمة في تصميم الفواصل الغازية حيث يتم تحديد قطر برج التجفيف على أساس سرعة الغاز مع اختلاف وحيد هو أن قيم

المعامل التصميمي (k) يتم أخذها من الجدول التالي:

صواني أكواب الفقاقيع	K(ft/sec)
تباعد 20"	0.14
تباعد 24"	0.16
تباعد 30"	0.17
حشوة إنشائية	0.3-0.4

الجدول (4.1)، قيم المعامل التصميمي (k)

تصميم وحدة تجفيف غاز الآراك

يراد تجفيف (59.4132MMscf l d) من الغاز الطبيعي ذي التركيب التالي وذلك باستخدام نظام (TEG)

Componet	Normalised Mol%	Compressibility Factor	Relative Density
Methane	91.53	0.04	0.507
Ethane	2.086	0.0019	0.0217
Propan	0.602	0.0008	0.0092
Iso-Butane	0.146	0.0003	0.0029
N-butane	0.128	0.0002	0.0026
neo-Pentane	0.002	0000	0000
Iso-Pentane	0.068	0.0002	0.0017
n-Pentane	0.029	0.0001	0.0007
G.C6a	0.06	0.0002	0.0018
G.C6b	0.026	0.0001	0.0008
G.C7a	0.005	0000	0.0002
G.C7b	0.016	0.0001	0.0006
G.C8	0.043	0.0002	0.0017
G.C9	0.001	0000	0000
G.C10	0.003	0000	0.0001
G.C11	000	-	-
G.C12	000	-	-
Oxygen	0.67	0000	0.007
Nitrogen	4.783	0.0008	0.0463
Carbon Dioxide	0.405	0.0003	0.0062
Hydrogen Sulphide	000	-	-
TOTAL	100	0.0461	0.6041

الجدول (4.2) مواصفات الغاز في الآراك

والمطلوب تحديد ما يلي :

- 1) تعيين تركيز (TEG) وذلك للحصول على ($7 \text{ lb}_{\text{water}}/\text{MMscf}$) في التيار الغازي الخارج من برج التجفيف.
- 2) تعيين عدد صواني أكواب الفقاع أو ارتفاع الحشوة الانشائية اللازم تركيبها داخل برج التجفيف وذلك للحصول على مواصفات نقطة الندى المطلوبة للتيار الغازي
- 3) تحديد قطر برج التجفيف اللازم لإنشاء هذه العملية . علماً أن شروط عمل برج التجفيف هي كالتالي:

- الضغط: $p=913.74 \text{ psia}$

- الحرارة: $T=113\text{F}^\circ$

- معدل تدفق الغاز: $q=59.4132\text{MMscf} / d$

***** الحسابات العملية *****

بعد إجراء الحسابات على المزيج الغازي تم تحديد الكثافة النسبية للمزيج الغازي ومعامل الانضغاطية كما يلي:

❖ عامل الإنضغاطية (Compressibility Factor): $Z=0.9979$

❖ الكثافة النسبية الحقيقية (Real relative Density) : $\Delta = 0.6051$

1) تحديد تركيز (TEG) المطلوب وذلك للحصول على

($7 \text{ lb}_{\text{water}}/\text{MMscf}$) في التيار الغازي الخارج من برج التجفيف.

من الشكل (3.1) نجد أن نقطة الندى المكافئة للمحتوى

($7 \text{ lb}_{\text{water}}/\text{MMscf}$) وذلك عند الضغط ($P=913.74\text{Pasia}$) هي Dew

($H_2O \text{ point}=29\text{F}^\circ$) ، ومع الأخذ بعين الاعتبار قيمة التوازن الذي يمكن بلوغه (10F°) ،

نجد أن التركيز المطلوب هو ($\text{TEG}=99.1\text{w}_t\%$).

2) تعيين عدد مراحل التوازن (N) وذلك باتباع منهجية الحساب التالية:

- حساب كفاءة إزالة المياه:

من الشكل (3,1) وذلك مقابل شروط عمل تجفيف ($P=913.74\text{Pasia}_T=113\text{F}^\circ$)

نجد أن ($w_{in}=91\text{lb}_{\text{water}}/\text{MMscf}$)

وبالتالي نجد أن

$$\frac{w_{in}-w_{out}}{w_{in}} = \frac{91-7}{91} = 0.923$$

من الشكل (3,4) وعند معدل الدوران ($3 \text{ galTEG}/\text{lbH}_2 \text{ O}$) والتركيز

($\text{TEG}=99.1 \text{ w}_t\%$) نجد أن:

$$\frac{W_{in}-W_{out}}{W_{in}}=0.89$$

من الشكل (4,4) وعند معدل الدوران (3 galTEG/lbH₂O)

نجد أن: (TEG=99.1 wt%)

$$\frac{W_{in}-W_{out}}{W_{in}}=0.93$$

عندئذ يتم استعمال القيمة (N=2)

(3) على أن الكفاءة الكلية للصينية الواحدة هي (25%) فهذا يعني عملياً أن عدد مراحل التوازن (N=2) تكافئ (8) صواني من نوع أكواب الفقائيع البعد فيما بينها يساوي (24). أو أن (N=2) تكافئ عملياً حشوة إنشائية بارتفاع (10ft).

(4) تحديد أبعاد برج التجفيف:

- تحديد الكتلة المولية الظاهرية للمزيج الغازي:

$$M_m = \Delta \times 28.97 = 0.6015 \times 28.97 = 17.53 \text{ lb/lb.mol}$$

- تحديد التدفق الكتلي في الشروط القياسية:

$$G = p_s \cdot Q_s = \frac{59.4132 \times 10^6}{379.3 \times 24 \times 3600} \times 17.53 = 31.78 \text{ lb/sec}$$

- تحديد كثافة المزيج الغازي في شروط العمل:

$$p_m = \frac{p \cdot M_m}{Z_m \cdot R_u \cdot T} = \frac{913.74 \times 17.53}{0.9979 \times 10.73 \times 572.67} = 2.612 \text{ lb/ft}^3$$

- تحديد التدفق الحجمي في شروط العمل:

$$Q_g = \frac{G}{p_m} = \frac{31.78}{2.612} = 12.167 \text{ ft}^3/\text{sec}$$

- تحديد السرعة الحدية للغاز:

$$v_t = K \cdot \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_g}} = 0.16 \times \sqrt{\frac{69.9 - 2.612}{2.612}} = 0.812 \text{ ft/sec}$$

- يتم تحديد قطر برج التجفيف المجهز بصواني من العلاقة التالية:

$$A = \frac{Q_g}{v_t} = \frac{12.167}{0.812} = 14.984 \text{ ft}^3$$

$$D_B = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 14.984}{\pi}} = 4.369 \text{ ft}$$

- يتم تحديد قطر برج التجفيف المجهز بحشوة إنشائية من العلاقة التالية:

$$D_S = \left(\frac{C_{BubbleCap}}{C_{structured}} \right)^{0.5} \cdot D_{BubbleCap} = \left(\frac{567}{1200} \right)^{0.5} \times 4.369 = 3.027 \text{ ft}$$

النتائج والمقترحات :

1. تستدعي المؤشرات التكنو اقتصادية ضرورة تجفيف الغاز الطبيعي للأسباب التالية:
 - منع تشكل الهيدرات وبالتالي تجنب انسداد خط الأنابيب والأجهزة السطحية الأخرى .
 - لتجنب مشاكل التآكل وذلك في حال احتواء الغاز الطبيعي على غازات حامضية.
 - يمكن أن يشكل وجود الماء السائل في أنابيب نقل الغاز الطبيعي أحد أهم الأسباب الرئيسية في حدوث الجريان الدفقي (*Slugging flow*) مخفضاً في ذلك من كفاءة خط الأنابيب.
 - يؤدي وجود بخار الماء في الغاز الطبيعي إلى التقليل من القيمة الحرارية (*Heating value*) للغاز المنقول .
 2. تزداد انحلالية الماء (*Solubility of water*) في الغاز الطبيعي بازياد درجة الحرارة وبانخفاض الضغط، كما أن وجود الملح في الماء السائل الموجود في حالة تماس مع الغاز الطبيعي يخفض من محتوى بخار الماء في الغاز.
 3. أثبتت الدراسات المخبرية والحسابات الحقلية ما يلي :
 - يعتبر استخدام (EG) الاختيار الأفضل من أجل أنابيب نقل الغاز الرئيسية (*Natural gas transmission lines*) لأنه يحقق أكبر انخفاض في نقطة الندى، بالرغم من أن هذا سيكون على حساب استرداده بسبب ضغط بخاره العالي (*Hight vapor pressure*) .
 - يستخدم (EG) في حماية الخزانات (*Vessels*) والأجهزة الموجودة في تماس مع العناصر الهيدروكربونية (*Hydrocarbon Compounds*) بسبب انحلاليته المنخفضة (*Low Solubility*) في المركبات الهيدروكربونية المتعددة العناصر (*Muiticomponent hydrocarbons*).
 - في الحالات التي يؤخذ فيها بالحسبان الضياعات الناتجة عن البخر (*Vaporization Losses*) فإنه من المستحسن استخدام (DEG) أو (TEG) بسبب ضغوطهم البخارية المنخفضة.
 4. تمتاز أبراج التجفيف (*Glycol dehydrators*) التي تستخدم (TEG) مقارنة مع طرق التجفيف الأخرى (بالتبريد، بالانضغاط ثم التبريد والادمصاص) بالمحاسن التالية:
 - كلفة اقتصادية منخفضة للأجهزة الأولية (*initial _equipment*) المستخدمة.
 - هبوط بسيط للضغط (*Low-pressure drop*) على طول أبراج الامتصاص (*Absorption towers*)
 - يتم تنفيذ عملية التنشيط بدون أي مشاكل.
 - يمكن استخدام هذه الوحدات بشكل مرضٍ جداً عند وجود بعض المواد التي تسبب تلويث بعض المجففات الصلبة.
 5. كانت أبعاد المجفف المستخدم في محطة الأراك هي التالية:
قطر المجفف = 1829 mm
ارتفاع قسم التجفيف = 8383 mm
عدد الصواني = 10
- وبالمقارنة مع النتائج الحسابية التي حصلنا عليها بالتصميم نجد أننا حصلنا على عدد صواني أقل وارتفاع أقل وقطر أقل وذلك يعود لأننا بنينا حساباتنا على أساس الشروط التشغيلية الحالية

للمحطة وأن الزيادة في القطر والإرتفاع وعدد الصواني يسمح لنا بإمكانية زيادة طاقة عمل المجفف بزيادة تدفق الغاز لقيم أكبر.

المراجع العلمية:

- 1- Engineering data book, 15th ed., Gas Processing Supplies Association, Tulsa, Ok, 1987
- 2- Arnold, K. and Stewart, M., Surface Production Operations, Gulf Publishing, Houston, TX, 1998, Vol.2.
- 4- Abdel -Aal, H.k., Surface Petroleum Operations, Saudi Publishing and Distributing House, Jeddah, 1998.
- 5- Sivalls. C.R., Glycol Dehydration Design Manual, Sivalls Inc., Odessa, TX, 1976.
- 6- Campbell, J.M., Gas Conditioning and Processing, Campbell Vol. 1, Norman, Ok, 1978.

المصطلحات العلمية:

A	
Associated Gas	الغاز المرافق
Acide Gas	الغازات الحامضية
Absorption towers	أبراج الامتصاص
absolute Humidity	الرطوبة المطلقة
Absorption	الامتصاص
Adsorption	الامتزاز
Absorption towers	أبراج الامتصاص
B	
Bubble Cap Trays	صواني فجاجين الفقاع
C	
Condensate	المكثفات
Cooled Mirror	مرآة مبردة
condensed Aqueous phase	الطور المائي المتكاثف
cryogenic Conditions contactor	شروط درجات الحرارة المنخفضة جداً
Circulation Rate	معدل الدوران
Contactor	برج الامتصاص أو التجفيف
D	
Desolved Gas	غازات منحلة
Distillation	التجفيف بواسطة التقطير
Distillation System	أنظمة التجفيف
E	
Equilibrium Stage	مراحل التوازن
G	
Gas Cap	غازات القبة الغازية
Gas Compressibility	انضغاطية الغاز
Gas Density	كثافة الغازات
Gravimetric Method	الطريقة الثقيلة
Gas Dehydration	تجفيف الغاز
Glycol Dehydration	التجفيف باستخدام الغليكول
H	
Hydrate Region	منطقة الهيدرات
Hydrate Inhibition	موانع تشكل الهيدرات
Height of packing	ارتفاع الحشوة الانشائية

Heating _value	القيمة الحرارية
I	
equipment -Initial	الأجهزة الأولية
Inert Gas	الغازات الخاملة
L	
Liquefied Natural Gas	الغازات الطبيعية المسالة
Liquefied Petroleum Gas	الغازات النفطية المسالة
Lean -rich Heat Exchanger	مبادل حراري
M	
Membrae Permeation	التجفيف باستخدام الأغشية النفوذة
Metastable Liquid	السائل شبه المستقر
Magnesium Perchlorate	فوق كلورات المغنزيوم
Natural gas	الغاز الطبيعي
Non Associated Gas	الغاز الحر
Natural Gasoline	الغازولين الطبيعي
P	
Plankton	العوالق
R	
Relative Humidity	الرطوبة النسبية
Refrigeration	التجفيف بالتبريد
Refrigeration plants	وحدات التبريد
S	
Specific Humidity	الرطوبة النوعية
Structured Packing	الحشوة الانشائية
Solubility of water	انحلالية الماء
Slugging flow	الجريان الدفقي
V	
Vessel	الخرانات
	نقطة ندى الماء
W	
Water Dewpoint	نقطة ندى للماء
Z-Factor	عامل انحراف الغازات