

المحاضرة 3

الفصل الثالث

منظومات الغاز - المكثف Gas - Condensate Systems

عندما امتد استكشاف الغاز الطبيعي إلى الطبقات العميقة، تم اكتشاف العديد من المكامن التي تحتوي على مكثفات الغاز. قد يتواجد الغاز بالحالة الغازية Gaseous phases عند الظروف الأولية للمكمن، ولكنه يتكاثف أحياناً في نقطة ما أثناء جريانه في طريقه إلى الفواصل (Seperators).

إن التصميم الهندسي لهذه المنظومات الإنتاجية يتطلب فهماً لسلوكية الطور. وسيهتم هذا الفصل بخاصة التحول الطوري وطرق حسابها.

3-1- السلوك الطوري للمائع الأحادي الكون:

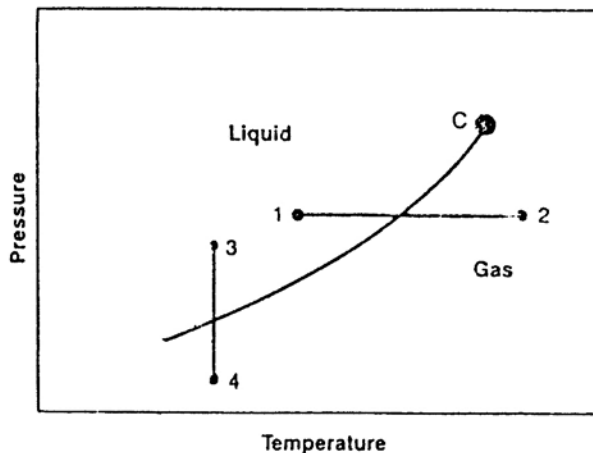
تعتبر سلوكية الطور بسيطة إذا ما كانت منظومات المكمن . أحادية، ولكنها تصبح أكثر تعقيداً كلما أضيفت مكونات أخرى. إن مناقشة أبسط الحالات سيؤدي إلى فهم الخلائط الأكثر تعقيداً. يمكن توصيف السلوكية الطورية للمائع، بتحديد استجابتها لتغيرات الضغط والحرارة. بشكل عام يمكن القول بأن جزيئات المادة تخضع للتأثير المتبادل فيما بينها، وهذا التأثير ينتج عن مجموعتين من القوى وهي:

- القوى المقيدة وتنتج بالأساس عن الضغط والتجاذب الجزيئي.
- القوى المحررة وهي الطاقة الكامنة والتنافر الجزيئي.

فإذا أدت محصلة القوى المقيدة والمحررة إلى التقارب الكبير بين الجزيئات، تكون المادة في طورها السائل. وإذا لعبت محصلة القوى دوراً في تباعد الجزيئات كان المائع غازاً. لا بد من الإشارة إلى أن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى زيادة الطاقة الداخلية أي زيادة القوى المحررة، بينما ارتفاع الضغط سيزيد من القوى المقيدة.

يمكن توضيح التحول الطوري للمائع الأحادي بالعلاقة مع تغيرات الضغط والحرارة كما في الشكل

(3-1).



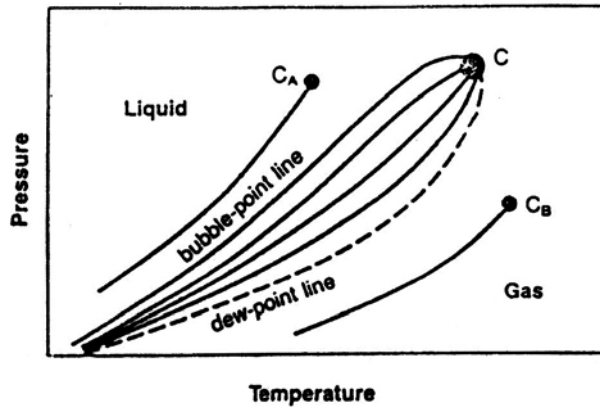
الشكل (3-1) مخطط التحول الطوري لمادة نقية.

يمثل الخط المنحني على الشكل النقاط التي تتساوى بها القوى المقيدة والمحركة. أي نقطة تقع فوق هذا الخط يكون عندها المائع سائلاً، بينما أسفل الخط يكون المائع غازاً. أما في النقطة الحرجة (C) فليس هناك تمييزاً بين السائل والغاز. يحصل تغيير للطور في الضغط الثابت عندما تتغير درجة الحرارة المسار (1-2). كما يحصل تغيير للطور أيضاً لدرجة الحرارة الثابتة، كلما تغير الضغط المسار (3-4).

3-2- السلوك الطوري للموائع متعددة المكونات:

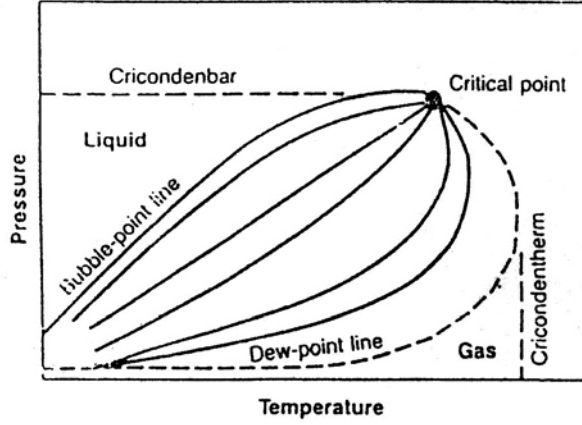
عندما يكون هناك أكثر من مركب فإن الاختلاف في حجم وطاقة الجزيئات سيؤثر على التحولات الطورية. الشكل (3-2) يوضح مخطط التحول الطوري لخليط ثنائي المكونات والشكل (3-3) يبين مخطط الطور لخليط متعدد المكونات.

إن موقع النقاط الذي يتم عنده ظهور أول فقاعة غاز في السائل عند اختلاف ظروف الضغط والحرارة يدعى خط نقطة الفقاعة (Bubble Point Line)، كما أن موقع النقاط التي يتم عندها ظهور أول قطرة للسائل في الغاز عند اختلاف الشروط يدعى خط نقطة الندى (Dew Point Line). إن أعلى ضغط يمكن أن يوجد فيه الغاز يدعى بضغط التكثيف الحرج (Criconden bar)، بينما أعلى درجة حرارة يمكن أن يوجد فيها السائل تدعى بدرجة حرارة التكثيف الحرجة (Criconden therm).



الشكل (3-2) مسارات ضغط البخار لمكونتين نقيين

ومخطط الطور لخليطهما 50:50



الشكل (3-3) المخطط الطوري لعدة مركبات،
يوضح ضغط وحرارة التكثيف الحرجة.

3-3- تحديد نسب المركبات في الطورين الغازي والسائل:

يمكن توصيف سلوكية الطور للمحلول المثالي (Ideal Solution) بجمع قوانين راؤول ودالتن، وذلك للحصول على كمية الغاز والسائل الموجودين عند شروط معينة من الضغط والحرارة.

ينص قانون راؤول على أن الضغط الجزئي لأحد مكونات الغاز يساوي النسبة المولية لذلك المكون في السائل مضروباً بضغط بخار المكون النقي:

$$(3-1) p_i = x_i p_{vi}$$

حيث أن:

p_i - الضغط الجزئي للمركب i في الغاز الموجود بحالة توازن مع السائل.

x_i - الكسر المولي للمركب i في السائل.

p_{vi} - ضغط البخار للمركب النقي i عند درجة الحرارة المعنية.

وحسب قانون دالتن يمكن حساب الضغط الجزئي الناتج عن مكون i في خليط غازي بالعلاقة:

$$(3-2) p_i = y_i p$$

p - الضغط الكلي.

من المعادلتين (2-1) و (2-2) ينتج لدينا:

$$y_i p = x_i p_{vi}$$

$$(3-3) \frac{y_i}{x_i} = \frac{p_{vi}}{p}$$

من أجل تحديد x_i و y_i نفرض ما يلي:

n - العدد الكلي للمولات في الخليط.

n_g - عدد المولات الكلي في الطور الغازي.

n_L - عدد المولات الكلي في الطور السائل.

z_i - النسبة المولية للمركب i في الطورين (السائل والغاز).

- x_i - النسبة المولية للمركب i في السائل.
- y_i - النسبة المولية للمركب i في الغاز.
- z_{in} - عدد مولات المركب i في الخليط الكلي.
- x_{inL} - عدد مولات المركب i في السائل.
- y_{inG} - عدد مولات المركب i في الغاز.

من خلال معادلة ائزان المادة يمكن كتابة:

$$(3-4) z_{in} = x_{inL} + y_{inG}$$

بحذف y_i من المعادلتين (3-3) و (3-4) ينتج لدينا العلاقة التالية:

$$(3-5) x_i = \frac{z_{in}}{n_L + \frac{p_{vi}}{p} \cdot n_g}$$

وبما أن $\sum x_i = 1$ بالتعريف فيمكن كتابة:

$$\sum x_i = \sum \frac{z_{in}}{n_L + \frac{p_{vi}}{p} \cdot n_g} = 1 \quad (3-6)$$

وبحذف x_i ينتج:

$$\sum y_i = \frac{z_{in}}{n_g + \frac{p}{p_{vi}} \cdot n_L} \quad (3-7)$$

وبما أن $\sum y_i = 1$ بالتعريف فإن:

$$\sum y_i = \sum \frac{z_{in}}{n_g + \frac{p}{p_{vi}} \cdot n_L} = 1 \quad (3-8)$$

يمكن استخدام المعادلات (3-6) و (3-8) لحساب التراكيب الطورية لخليط الغاز والسائل الموجودين في حالة توازن، وفي كلتا المعادلتين يتطلب الحل أسلوب الخطأ والصواب. (Trial- and error Solution). لتبسيط عملية الحساب يؤخذ واحد مول من الخليط الكلي، بحيث: $\frac{n_g}{n} = n_g$ ،

$$n_L + n_g = 1 \quad , \quad \frac{n_L}{n} = n_L$$

عندئذ تصبح المعادلات (3-7) و (3-8) من الشكل:

$$\sum x_i = \sum \frac{z_i}{1 + n_g \left(\frac{p_{vi}}{p} - 1 \right)} = 1 \quad (3-9)$$

$$\sum y_i = \sum \frac{z_i}{1 + n_L \left(\frac{p}{p_{vi}} - 1 \right)} = 1 \quad (3-10)$$

عملياً، يعتبر استخدام المعادلتين (3-9) و (3-10) لتقدير سلوك الموازنة (غاز . سائل) محدوداً جداً، حيث أن قانون دالتن يستند على افتراض أن الغاز مثالي وبالتالي تستخدم المعادلات فقط من أجل الضغوط الأقل من 50 Psia. كما يستند قانون راؤول على افتراض أن السائل يسلك سلوك المحلول المثالي. حيث أن سلوك المحلول المثالي يمكن الوصول إليه فقط إذا كانت مكونات سائل الخليط متشابهة كيميائياً وفيزيائياً. هذه التغييرات أدت إلى استخدام مضاهاة تستند على الملاحظات التجريبية، وتشمل عادة هذه المضاهاة استخدام ثابت نسبة التوازن

K (equilibrium ratio)، التي تعرف كما يلي:

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} \quad (3-11)$$

تحدد قيم ثابت التوازن K بالعلاقة مع الضغط والحرارة من مخططات خاصة. من المعادلة (3-3) يلاحظ أن قيمة K تعرف بأنها نسبة ضغط بخار المكون إلى ضغط المنظومة، أو:

$$\frac{p_{vi}}{p} = \frac{y_i}{x_i} = K_i \quad (3-12)$$

بالتعويض في المعادلات (3-9) و (3-10) ينتج أن:

$$\sum x_i = \sum \frac{z_i}{1 + n_g (K_i - 1)} = 1 \quad (3-13)$$

$$\sum y_i = \sum \frac{z_i}{1 + n_L \left(\frac{1}{K_i} - 1 \right)} = 1 \quad (3-14)$$

يتطلب حل هاتين المعادلتين أسلوب الخطأ والصواب، حيث يتم اختيار قيم تجريبية متعاقبة لـ n_g و n_L إلى أن يصبح المجموع يساوي الواحد. المعلومات المطلوبة لمعرفة تركيب الخليط هي تركيب المائع الداخل (Feed Composition)، الضغط ودرجة الحرارة التي يتم عندها الفصل والمعامل K لكل مكون عند الضغط ودرجة الحرارة المعينين، حيث يتم اتباع الخطوات التالية:

- 1- إيجاد القيم الملائمة لـ K لكل مكون عند ضغط ودرجة حرارة الفصل.
- 2- يتم افتراض قيمة لـ n_g وتحسب قيمة n_L من المعادلة $n_L + n_g = 1$ وذلك لمول من المائع الداخل.

- 3- تحسب مجموع أجزاء المول لكل المكونات باستخدام القيمة المفروضة n_g في الخطوة (2) من العلاقة (3-13).

4- إذا كان المجموع المحتسب في الخطوة (3) يساوي الواحد، فإن الافتراض الذي اختير لقيمة n_g كان صحيحاً. وإذا لم يكن كذلك نفترض قيمة جديدة لـ n_g ونعيد الخطوة (3) لحين بلوغ مجموع المقدار (1).

إن قيم x_i التي تم حسابها في الخطوة (3) تمثل تركيب مولات n_L للسائل الناتج عن الفصل وبالتالي تركيب مولات n_g يمكن حسابه من المعادلة:

$$y_i = K_i x_i$$

مثال (3-1):

احسب كمية وتركيب طور كل من الغاز والسائل الناتجين عن عملية فصل لمائع عند ضغط 200 Psia ودرجة حرارة $150^\circ F$.

المركب	z_i	K_i	$\frac{n_g = 0.5}{x_i}$	$\frac{n_g = 0.4}{x_i}$	$\frac{n_g = 0.42}{x_i}$	y_i
C ₃	0.61	1.520	0.464	0.505	0.501	0.761
n-C ₄	0.28	0.595	0.351	0.334	0.337	0.201
n-C ₅	0.11	0.236	0.178	0.158	$\frac{0.162}{1.000}$	$\frac{0.038}{1.000}$

بما أن $\sum x_i = 1$ بالنسبة لـ $n_g = 0.42$ فإن هذا يعني أن 0.42% من المائع سيكون في الطور الغازي و 0.58% في طور السائل.

يمكن استخدام المعادلات السابقة لتحديد ضغط نقطة الفقاعة P_b وضغط نقطة الندى P_d لخليط عند درجة حرارة معينة. عند نقطة الفقاعة وتكون كمية الغاز مهملة أي $z_i = x_i$ عندئذ يمكن كتابة:

$$y_i = x_i K_i = z_i K_i \quad (3-15)$$

$$\sum y_i = \sum z_i K_i = 1$$

عند ضغط نقطة الندى تكون كمية السائل مهملة أي $z_i = y_i$ وبشكل مشابه يمكن كتابة:

$$\sum x_i = \sum \frac{z_i}{K_i} = 1 \quad (3-16)$$

يمكن تحديد ضغوط نقطة الفقاعة والندى بطريقة التجربة والخطأ، وذلك بافتراض قيماً متعددة للضغوط وتحديد الضغط الذي يقابله قيم (K) التي تحقق المعادلات (3-15) و (3-16) وأن المعايير التي تساعد في تحديد P_b و P_d هي:

- إذا كانت القيم $\sum z_i K_i$ و $\sum \frac{z_i}{K_i}$ أكبر من الواحد فإن قيمة الضغط المفترضة P تكون واقعة بين القيمتين P_b و P_d .
- إذا كان $\sum z_i K_i < 1$ فإن $P < P_b$.
- إذا كان $\sum \frac{z_i}{K_i} < 1$ فإن $P < P_d$.

مثال (3-2):

احسب ضغط نقطة الفقاعة للخليط الوارد في المثال السابق عند درجة الحرارة 150°F .

الحل:

من المثال السابق يتضح أن ضغط نقطة الفقاعة أكبر من 200 Psia وكافتراض أولي نستخدم

$$P_b = 250 \text{ Psia}$$

المركب	z_i	K_i	$z_i K_i$
C_3	0.61	1.270	0.775
n- C_4	0.28	0.500	0.140
n- C_5	0.11	0.203	<u>0.022</u>
			0.937

إن الضغط المفروض هو أكبر من ضغط نقطة الفقاعة حيث $\sum z_i K_i < 1$.

المحاولة الثانية: $P_b = 220 \text{ Psia}$

المركب	z_i	K_i	$z_i K_i$
C_3	0.61	1.490	0.909
n- C_4	0.28	0.580	0.162
n- C_5	0.11	0.230	0.025

الواقع أن $\sum z_i K_i > 1$ يعني أن القيمة 220 Psia هي أدنى من ضغط نقطة الفقاعة لذلك تم

المحاولة الثالثة: $P_b = 230 \text{ Psia}$

المركب	z_i	K_i	$z_i K_i$
C_3	0.61	1.370	0.824
n- C_4	0.28	0.534	0.150
n- C_5	0.11	0.223	<u>0.025</u>
			0.999

بناءً عليه سيكون ضغط نقطة الفقاعة 230 Psia عند درجة الحرارة 150°F .