استنتاج صيغة بلانك لقانون الترموديناميك الثاني من صيغة كلاوزيوس

الدكتور المهندس نبيل عبده[1]

الملخص

في الوقت الحاضر هناك عدد من الصيغ التجريبية لقانون الترموديناميك الثاني ينتج كل منها عن إحدى الظواهر الملحوظة؛ ولكنها جميعاً ذات مضمون مشترك أي أنها لا تتناقض فيما بينها. وندرج بعضاً منها فيما يأتي:

1- صيغة ماكس بلانك: "يستحيل إنشاء محرك عامل دورياً بحيث يقوم فقط برفع الحمل وتبريد مصدر الحرارة". وعليه فإن هذه الصيغة تؤكد استحالة الحصول المستمر على الطاقة الميكانيكية (رفع الحمل) عند توفر خزان حراري وحيد يتبرد كي يتم تحويل كامل حرارة تبريده إلى عمل.

2- صيغة كلاوزيوس: إن الحرارة لا يمكن أن تنتقل وحدها (تلقائياً) من جسم إلى جسم آخر ذي درجة حرارة أعلى من الجسم الأول.

في هذا البحث سنستنتج صيغة بلانك من صيغة كلاوزيوس.

الكلمات المفتاحية: العملية العكوسة، العملية اللاعكوسة

[1] مدرس– كلية الزراعة – جامعة دمشق.

قائمة بالرموز والمصطلحات العلمية:

Q، q كمية الحرارة المعطاة للمادة، كمية الحرارة المعطاة لـِ $1\ kg$ من المادة

p الضغط

s إنتروبي $1\ kg$ من المادة (الإنتروبي النوعي)

T درجة الحرارة المطلقة

v الحجم النوعي

w العمل الذي ينجزه $1\ kg$ من المادة

الرموز السفلية:

ad أدياباتي Adiabatic

g المكتسب Gained

r المنبوذ Rejected

res خزان الحرارة Heat reservoir

$w.b$ جسم التشغيل Working body

$\circ$ مفيد (خاص بالدورة المثالية) Useful

1- المقدمة [4]:

في النصف الأول من القرن الثامن عشر كان العلم يعدُّ الحرارة شيئاً خاصاً لا وزن له ولا يمكن خلقه أو إفناؤه وأطلق عليه اسم مولد الحرارة. وقد كان العالم الروسي لومانوسوف Mikhail Lomonosov أحد العلماء الأوائل الذين رفضوا فكرة مولد الحرارة. وهو الذي وضع المبدأ العام للبقاء الذي سمي فيما بعد بقانون لومانوسوف.

في منتصف القرن التاسع عشر أي بعد مضي قرابة قرن على قانون لومانوسوف قام عدد من العلماء (كارنو Carnot، ماير Meyer، كلاوزيوس Clausius، هلمهولتس Helmholts، توسون Thompson وآخرون) بدراسة الظواهر الحرارية وعمل

الآلات الحرارية. وقد وضع هؤلاء العلماء قانوني الترموديناميك الأول والثاني محددين بذلك الفكرة العامة التي اقترحها لومانوسوف.

وقانونا الترموديناميك هما أساس ذلك الفرع من العلم الذي يدرس تحول الطاقة الحرارية إلى ميكانيكية (أي أساس الترموديناميك التكنيكي).

2- صيغ قانون بقاء الطاقة وتحولها وقانون الترموديناميك الأول [4]:

يصاغ قانون بقاء الطاقة وتحولها (مبدأ مصونية الطاقة) هكذا: "**إن الطاقة لا تخلق من عدم ولا تفنى، ولكنها يمكن أن تحول من شكل إلى آخر فقط**".

أما صيغ قانون الترموديناميك الأول فيما يخصُّ الحرارية والميكانيكية فهي:

2-1- في جميع الأحوال عندما تختفي كمية ما من الحرارة تظهر كمية معينة من الطاقة الميكانيكية (على شكل عمل منجز)، وعلى العكس عند إنجاز عمل ما (على حساب صرف كمية مساوية له من الطاقة الميكانيكية) تظهر كمية معينة من الطاقة الحرارية.

2– 2– يستحيل إنشاء محرك أبدي من النوع الأول. والمحرك الأبدي من النوع الأول هو محرك يستطيع إنتاج الطاقة دون أن يستهلك أي طاقة.

3– صيغ قانون الترموديناميك الثاني [4]:

هناك عدد من الصيغ لقانون الترموديناميك الثاني ينتج كل منها عن إحدى الظواهر الملحوظة؛ ولكنها جميعاً ذات مضمون مشترك.

3-1- صيغة ماكس بلانك: "**يستحيل إنشاء محرك عامل دورياً بحيث يقوم فقط برفع الحمل وتبريد مصدر الحرارة**". وعليه فإن هذه الصيغة تؤكد استحالة الحصول **المستمر** على **الطاقة الميكانيكية** (رفع الحمل) عند توفر خزان حراري وحيد يتبرد كي يتم تحويل كامل حرارة تبريده إلى عمل.

3-2- "**يستحيل إنشاء محرك أبدي من النوع الثاني**". والمحرك الأبدي من النوع الثاني محرك يعمل باستمرار عند توفر مصدر حراري وحيد.

3-3- صيغة وليام تومسون: "**في الطبيعة يستحيل أن تتم عملية يقتصر مفعولها على تبريد خزان الحرارة وما يعادل هذا التبريد من رفع الحمل**".

4-3- صيغة كلاوزيوس: **إن الحرارة لا يمكن أن تنتقل وحدها (تلقائياً) من جسم إلى جسم آخر ذي درجة حرارة أعلى من الجسم الأول.**

5-3- العمليات التلقائية لاعكوسة.

هذه هي صيغ قانون الترموديناميك الثاني بشكلها التجريبي أي الناتجة عن المراقبة. وتجدر الإشارة هنا إلى أن تعميم هذا القانون على شروط مغايرة للشروط التي جرت عندها المراقبة أمر باطل. ولكن هذا لا يعني عدم حتمية صحة قانون الترموديناميك الثاني في مجال الأبعاد التي تعمل فيها محركاتنا أي في حدود كوكبنا الأرضي.

وتؤكد المراجع أن الصيغ المختلفة لقانون الترموديناميك الثاني لا تتناقض فيما بينها، وأن شرط تحقيق عملية ما هو عدم مخالفتها لأيٍ من قانوني الترموديناميك الأول والثاني.

4- الدورة الحرارية [4]:

4- آ- الدورة الحرارية المباشرة (دورة المحرك): هي الدورة التي تنتج طاقة ميكانيكية وهي في مخططي p-v و T-s تسير باتجاه عقارب الساعة. في الدورة المباشرة يكون العمل الذي ينجزه الغاز خلال الدورة $w_\circ$ موجباً؛ كما تكون كمية الحرارة المعطاة للغاز خلال الدورة $q_\circ$ موجبةً؛ علماً بأن $q_\circ = w_\circ$. من هنا ينتج أن الدورة المباشرة تنتج عملاً؛ فهي إذاً دورة محرك.

4-ب- الدورة الحرارية العكسية: هي الدورة التي تسير في مخططي p-v و T-s بعكس اتجاه عقارب الساعة. هنا يكون عمل الغاز خلال الدورة $w_\circ = \sum_{Cycle} w$ سالباً؛ كما تكون كمية الحرارة التي يتبادلها الغاز خلال الدورة $q_\circ = \sum_{Cycle} q$ سالبةً. علماً بأن $q_\circ = w_\circ$. من هنا ينتج أن الدورة العكسية تستهلك عملاً؛ فهي إذاً غير

صالحة للمحركات، ولكنها صالحة للاستخدام في **آلات التبريد وآلات التدفئة الميكانيكية للمباني** (المضخات الحرارية).

5- بعض الافتراضات الخاصة بتحقيق العملية العكوسة والتي يجمع عليها المؤلفون [4]:

ما سنورده هنا يخص أيضاً الدورات الحرارية لأن الدورة الحرارية هي عملية ترموديناميكية مغلقة.

5 - أ – خزان الحرارة Heat reservoir هو جسم كبير جداً، مهما أعطيناه أو أخذنا منه حرارة فإن درجة حرارته لا تتغير.

5- ب– لتحقيق عملية تبادل حراري إيزوترمية عكوسة نحتاج إلى خزان حراري وحيد ذي درجة حرارة مساوية لدرجة حرارة جسم التشغيل.

هذا يعني أنه يمكننا، وبواسطة خزان حراري وحيد وبشكل عكوس، أن نحقق على جسم التشغيل عملية إيزوترمية مزدوجة (تمدد–انضغاط). فإذا أنهينا هذه العملية عند نقطة بدايتها حصلنا على دورة حرارية لا معنى لها لأن مساحتها – التي تقيس كلاً من عملها وكمية حرارتها المفيدين – يساوي الصفر.

5–ج– لتحقيق العملية الأدياباتية (العكوسة واللاعكوسة) لا نحتاج إلى أي خزان حراري.

6- حول تحقيق عملية تبادل حراري ذات اتجاه وحيد:

تحكم هذه العملية صيغة كلاوزيوس لقانون الترموديناميك الثاني (انظر الصيغة 3-4 أعلاه). هنا يتفق المؤلفون على أنه لتحقيق عملية تبادل حراري غير إيزوترمية وذات اتجاه وحيد (اكتساب جسم التشغيل للحرارة أو نبذه لها) نحتاج إلى خزان حراري وحيد (العملية هنا ستكون لاعكوسة). وتبعاً لنوع العملية يتحدد شرط درجة الحرارة لتحقيق العملية:

1.لعملية (مجموعة عمليات) اكتساب جسم التشغيل للحرارة يجب أن تكون درجة حرارة الخزان الحراري المعطي للحرارة (الخزان الأعلى) أكبر من درجة الحرارة العليا في العملية (مجموعة العمليات) أو تساويها.

2.لعملية (مجموعة عمليات) نبذ جسم التشغيل للحرارة يجب أن تكون درجة حرارة الخزان الحراري المستقبل للحرارة (الخزان الأدنى) أصغر من درجة الحرارة الدنيا في العملية (مجموعة العمليات) أو تساويها.

7- استنتاج صيغة بلانك لقانون الترموديناميك الثاني انطلاقاً من صيغة كلاوزيوس:

لنحاول تحقيق دورة حرارية في مخطط T_s من خلال جسم تشغيل (بارامتراته البدائية $T_{Iw.b}$ و $p_{Iw.b}$) وخزان حرارة وحيد درجة حرارته T_{res} ومصدر عمل. يجب أن نقول هنا: إنَّه عندما ننوي الحصول على آلة حرارية عاملة على نظام الدورات الحرارية – والتي سنسميها **آلةً حراريةً عاملةً دورياً** –لا نهتم بحالة جسم التشغيل البدائية. ذلك لأننا قادرون، من خلال استخدامٍ محدود لمصدر العمل وخزان الحرارة المتوافرين، أن نصل بجسم التشغيل إلى الحالة ($T_{1w.b}$ و $p_{1w.b}$) التي نريده أن يبدأ منها نظام الدورات الحرارية.

7-1- تغير الإنتروبي في عمليات تغير حالة الأجسام [4]:

لعمليات تغير حالة الأجسام تتحقق العلاقة الآتية:

$$s_2 - s_1 \geq \int_1^2 \frac{dq}{T} \qquad \text{أو} \qquad ds \geq \frac{dq}{T} \tag{1}$$

إشارة التراجح هنا تخص العملية اللاعكوسة؛ أما المساواة فتخص العملية العكوسة. استنتاج (1) موجود في معظم المراجع الترموديناميكية – سواء أكان مؤلفوها من التيار المؤيد للنموذج التقليدي أو من التيار الرافض له. فالعلاقة (1) تحمل الرقم «5-20» في [4] والرقم «8-10» في [5] والرقم «6-23» في [2] والرقم «7-8» في [6] والرقم «7-10» في [1].

تقسم عمليات تغير حالة جسم التشغيل في الدورة الحرارية إلى:

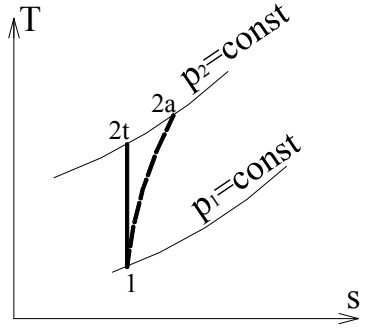
- العمليات الأديباتية لتغير حالة جسم التشغيل.
- عمليات اكتساب جسم التشغيل للحرارة.
- عمليات نبذ جسم التشغيل للحرارة.

بكتابة العلاقة (1) تطبيقاً على العمليات الأديباتية لتغير حالة جسم التشغيل في الدورة والتي تُعَرف بـِ $dq_{ad} = 0$ نجد:

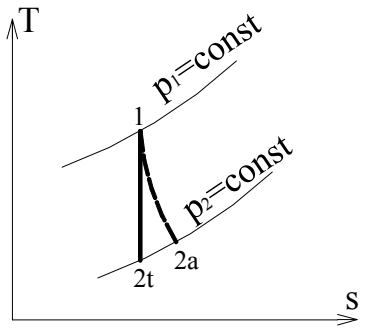
$$ds_{ad} \geq \frac{dq_{ad}}{T} = 0 \quad \text{أو} \quad ds_{ad} \geq 0 \qquad (\text{أ-1})$$

التي تصاغ هكذا: العمليات الأديباتية اللاعكوسة لتغير حالة جسم التشغيل هي عمليات متزايدة الإنتروبي، أما العمليات الأديباتية العكوسة فهي ثابتة الإنتروبي.

في الشكل (1) تظهر عملية التمدد الأديباتي، وفي الشكل (2) تظهر عملية الانضغاط الأديباتي. في كلا الشكلين العمليـــة *1-2t* عملية عكوســـة والعمليـــة *1-2a* عمليـــة لاعكوسة، وقد مثلت العمليات اللاعكوسة اصطلاحياً على المخططات.



الشكل رقم (2) مقتبس عن [4]



الشكل رقم (1) مقتبس عن [4]

بكتابة العلاقة (1) تطبيقاً على عمليات اكتساب جسم التشغيل للحرارة في الدورة والتي تُعَرف بـِ $dq_g > 0$ نجد $ds_g \geq \frac{dq_g}{T} > 0$ ومنه:

$$ds_g > 0 \qquad (\text{ب}-1)$$

التي تصاغ هكذا: عمليات اكتساب جسم التشغيل للحرارة هي عمليات متزايدة الإنتروبي.

بكتابة العلاقة (1) تطبيقاً على عمليات نبذ جسم التشغيل للحرارة في الدورة والتي تُعَرف بـِ $dq_r < 0$ نجد:

$$ds_r \geq \frac{dq_r}{T} < 0 \qquad (ج\ -1)$$

التي تصاغ هكذا: عمليات نبذ جسم التشغيل للحرارة متنوعة. فبعضها متزايد الإنتروبي وبعضها الآخر متناقص الإنتروبي وبعضها الأخير ثابت الإنتروبي. وقد يجتمع في الدورة الحرارية الواحدة أكثر من نوع واحد من العمليات. علماً بأن العمليات العكوسة لنبذ جسم التشغيل للحرارة متناقصة الإنتروبي حتماً لأن

$$. ds_r = \frac{dq_r}{T} < 0$$

7-2- عمليات تغير حالة جسم التشغيل عندما يتبادل الحرارة مع خزان حراري وحيد:

العمليات المبينة في الأشكال من 3 إلى 6 من هذه الفقرة هي عمليات غير متوازنة وهي من ثَمَّ لا عكوسة. وحسب [4] فإن التمثيل البياني لهذه العمليات غير ممكن، وإذا دعت الضرورة إلى تمثيل العمليات اللا متوازنة على مخططات فسيكون ذلك اصطلاحياً. وعندها لا تجوز الاستفادة من خواص المخططات. هذا يعني أن المساحات تحت منحنيات هذه العمليات في مخطط T_s لا تقيس كميات الحرارة المتبادلة مع جسم التشغيل.

العملية 3-2-1 (شكل 3) هي عملية لاعكوسة لاكتساب جسم التشغيل للحرارة من **خزان الحرارة الوحيد** T_{res}، فهي لاعكوسة لأن فرق درجات الحرارة بين جسم التشغيل وخزان الحرارة نهائي. وكما سبق وذكرنا (انظر الصيغة «5- ب») فإن العملية العكوسة الوحيدة الممكنة نظرياً هي العملية الإيزوترمية التي تكون فيها درجة

حرارة جسم التشغيل مساوية لدرجة حرارة الخزان أو أخفض منها بقيمة تفاضلية قدرها dT.

العمليات الممكنة كلها لاكتساب جسم التشغيل للحرارة من **خزان الحرارة الوحيد** T_{res}:

• تتوضع بكاملها تحت الإيزوترم T_{res} مُحَقِّقَةً بهذا الصيغة (6-1-1) التي تعبر عن صيغة كلاوزيوس لقانون الترموديناميك الثاني (انظر الصيغة «3-4 أعلاه») تطبيقاً على عمليات اكتساب جسم التشغيل للحرارة من الخزان T_{res}.

• وتحقق العلاقة (1- ب) التي تؤكد أن عمليات اكتساب جسم التشغيل للحرارة في مخطط T_s تتجه من اليسار نحو اليمين في آنٍ معاً.

ويكمن الاختلاف بين هذه العمليات بالشكل ومدى الاقتراب من الإيزوترم T_{res}.

العملية 8-7-6-5-4 (شكل 4) هي عملية لاعكوسة لنبذ الحرارة إلى خزان الحرارة T_{res}، فهي لاعكوسة لأن فرق درجات الحرارة بين جسم التشغيل وخزان الحرارة نهائي. وكما سبق وذكرنا (انظر الصيغة «5- ب») فإن العملية العكوسة الوحيدة الممكنة نظرياً هي العملية الإيزوترمية التي تكون فيها درجة حرارة جسم التشغيل مساوية لدرجة حرارة الخزان أو أعلى منها بقيمة تفاضلية قدرها dT.

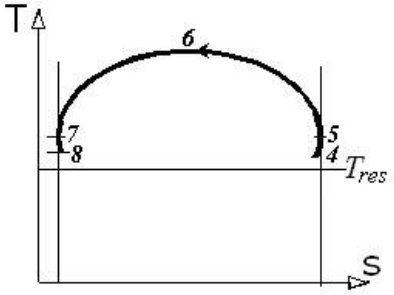
العمليات الممكنة كلها لنبذ جسم التشغيل للحرارة إلى **خزان الحرارة الوحيد** T_{res}:

• تتوضع بكاملها فوق الإيزوترم T_{res} محققة بهذا الصيغة (6-1-2) التي تعبر عن صيغة كلاوزيوس لقانون الترموديناميك الثاني (انظر الصيغة «3-4 أعلاه») تطبيقاً على عمليات نبذ جسم التشغيل للحرارة إلى الخزان T_{res}.

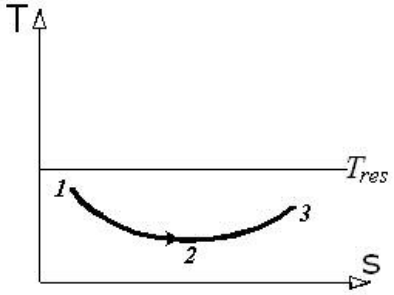
• وتحقق العلاقة (1- ب) التي تؤكد أن عمليات نبذ جسم التشغيل للحرارة في مخطط T_s يمكن أن تتجه بأي اتجاه، ولكن العمليات العكوسة لنبذ جسم التشغيل للحرارة في مخطط T_s تتجه من اليمين نحو اليسار.

ويكمن الاختلاف بين هذه العمليات بالشكل ومدى الاقتراب من الإيزوترم T_{res}.

العملية 8-7-6-5-4 (شكل 4) تمثل الحالة الأكثر عمومية للعملية اللاعكوسة لنبذ جسم التشغيل للحرارة؛ فهي ثابتة الإنتروبي في النقطتين (5) و (7) ومتناقصة الإنتروبي في المجال (5-6-7) ومتزايدة الإنتروبي في المجالين (4-5) و (7-8).

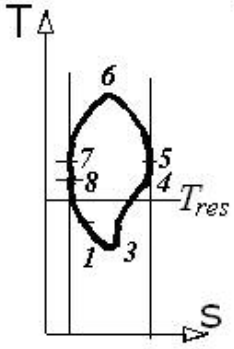


الشكل رقم (4)

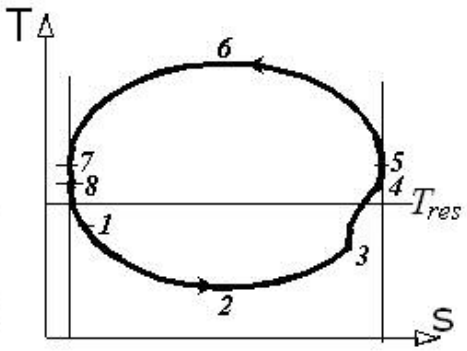


الشكل رقم (3)

7-3- تحديد الدورات التي يمكن تحقيقها بواسطة خزان حراري وحيد:



الشكل رقم (6)



الشكل رقم (5)

في الشكل (5) أنشأنا الدورة الحرارية 1-8-7-6-5-4-3-2-1 المؤلفة من:

العملية اللاعكوسة 3-2-1 لاكتساب الحرارة من خزان الحرارة T_{res} وتوضعها الحتمي تحت T_{res}، في حين أن اتجاهها الحتمي هو من اليسار إلى اليمين (انظر الشكل «3» وشرحه).

- عملية الانضغاط الأدياباتي اللاعكوس *3-4* وهي شبيهة بالعملية *1-2a* (شكل2).

• العملية اللاعكوسة 8-7-6-5-4 لنبذ الحرارة إلى خزان الحرارة T_{res} وتوضعها الحتمي فوق T_{res} (انظر الشكل «4» وشرحه). هنا، ولضرورات إغلاق الدورة، يكون الاتجاه السائد للعملية 8-7-6-5-4 هو من اليمين إلى اليسار.

• عملية التمدد الأدياباتي اللاعكوس *1-8* وهي شبيهة بالعملية *2a-1* (شكل1).

ملاحظة 1: إن الدورة 1-8-7-6-5-4-3-2-1 **التي حصلنا عليها في الشكل** (5) **والمحققة بواسطة الخزان الحراري الوحيد** T_{res}، **هي دورة عكسية** ولا يمكن الحصول على دورة مباشرة مع خزان وحيد لأن الخزان الحراري الوحيد T_{res} قد فرض علينا توضع عملية اكتساب جسم التشغيل للحرارة تحت الإيزوترم T_{res} كما فرض توضع عملية نبذ جسم التشغيل للحرارة فوق الإيزوترم T_{res}.

لنحاول تخفيض عدد العمليات في الدورة:

1. في حال كون أطراف العمليتين 3-2-1 و 8-7-6-5-4 واقعة على الإيزوترم T_{res} يمكن الاستغناء عن العمليتين الأدياباتيتين الجانبيتين ولكن **الدورة الناتجة ستبقى عكسية.**

2. يوحي شكل الدورة بأنه قد يمكن الاستغناء عن العملية اللاعكوسة 3-2-1 لاكتساب الحرارة من خزان الحرارة T_{res} ولو تمكنا من ذلك **لحصلنا على دورة عكسية أيضاً** (انظر الشكل رقم 6).

3. لا يمكن الاستغناء عن العملية اللاعكوسة 8-7-6-5-4 لنبذ الحرارة إلى خزان الحرارة T_{res} والإبقاء على العملية اللاعكوسة 3-2-1 لاكتساب الحرارة من الخزان والعمليتين الأدياباتيتين الجانبيتين، لأن العمليات الثلاث هي عمليات تزايد إنتروبي جسم التشغيل. لذا يتحتم الإبقاء على العملية الوحيدة 8-7-6-5-4 التي تستطيع إغلاق الدورة، التي **ستكون عكسية حتماً** (انظر الملاحظة 1).

ما تقدم (الملاحظة 1 والبنود الثلاثة التي تليها) يعني:

قاعدة رقم (1)**: إن الدورة المحققة بواسطة خزان حراري وحيد درجة حرارته** T_{res} **هي دورة عكسية حتماً.** أو:

قاعدة رقم (1- أ)**:** يستحيل تحقيق دورة حرارية مباشرة بواسطة خزان حراري وحيد ذي درجة حرارة ثابتة. فإذا تذكرنا أن الآلات العاملة بنظام الدورات الحرارية المباشرة هي نفسها المحركات العاملة دورياً حسب بلانك نستنتج بأن **القاعدة رقم** (1- أ) **التي استنتجناها من صيغة كلاوزيوس لقانون الترموديناميك الثاني ليست إلا صيغة بلانك للقانون نفسه** والتي تنص:

"**يستحيل إنشاء محرك عامل دورياً بحيث يقوم فقط برفع الحمل وتبريد مصدر الحرارة**".

بهذا نكون قد استنتجنا صيغة بلانك لقانون الترموديناميك الثاني من صيغة كلاوزيوس للقانون نفسه. وهو المطلوب

الخاتمة: مع أن صيغ قانون الترموديناميك الثاني المدرجة في الفقرة 3 تجريبية وناتجة عن ظواهر مختلفة ملحوظة في الطبيعة؛ فإن هذه الصيغ ذات مضمون مشترك ولا تتناقض فيما بينها؛ وبعضها مترابط رياضياً.

المراجـــع:

أولاً : **باللغة العربية**

1– جوردون .ج. فان وايلن وريتشارد .ا. سونتاج : **أساسيات الديناميكا الحراريـــة الكلاسيكية**، الطبعة الثانية، ترجمة الدكتور محمد سالم رضوان و مراجعة الـــدكتور عبد الرزاق عبد الفتاح، دار جون وايلي وأبنائه، نيويورك، 1981، ص 253–255

2– الدكتور محمد عبده باكير: **الترموديناميك الهندسي (الجزء الأول)**، جامعة البعث، 1999–2000، ص 177–179

3– الدكتور مفيد هلال: **الترموديناميك التكنيكي (الجـــزء الأول)**، جامعـــة دمـــشق، 1989–1990، ص 269–276، 287–291

4– الدكتور مفيد هلال: **الترموديناميك التكنيكي (الجـــزء الأول)**، جامعـــة دمـــشق، 2006–2007، ص 192–194، 240–242، 378–387، 438–444، 493–496.

ثانياً: باللغة الإنكليزية

5- Richard E. Sonntag, Claus Borgnakke, Gordon J. Van Wylen FUNDAMENTALS OF THERMODYNAMICS, 5th ed., John Wiley & Sons, Inc. 1997, pp 236-238

6- Yunus A. Cegel/Robert H. Turner, **Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences**, 2d ed. McGraw-Hill International Edition, 2005, pp 277-281

ثالثاً : **باللغة الروسية**

7- Litveen A.M., **Technical Thermodynamics**, 2nd ed. Gosoudarstvennoe Energeteecheskoe Press, Moscow-Leningrad, 1963, pp 89-90, 95-96.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 2008/6/10.