

الهضم اللاهوائي لمخلفات صناعة السكر - تأثير التخمر المشترك لنباتات الطاقة مع مخلفات المواشي في إنتاجية الميثان

فيتالي كروفورشكو⁽¹⁾ و رأفت العفيف⁽²⁾

الملخص

تعد معالجة المخلفات الزراعية الثانوية باستخدام الهضم اللاهوائي (AD) خياراً جيداً للحفاظ على بيئة نظيفة وتوليد الطاقة. إلا أن زيادة تحميل المخمر بالسكر يمكن أن يسبب عرقلة لعملية الهضم اللاهوائي. هدف البحث إلى تقييم أداء الهضم اللاهوائي لمخلفات صناعة الشوندر السكري [نقل الشوندر السكري (SP) ورؤوس جذوره (ST)] وخلاتهما وفق ثلاث نسب (30 و 50 و 70% مادة جافة) مع مخلفات الماشية ونباتات الطاقة (سيلاج الذرة والذرة البيضاء وعشب المروج). أجريت التجارب في مجموعة هاضم لاهوائية سعة كل منها ليتر واحد ضمن درجة حرارة 38°C مدة 60 يوماً. تراوح ناتج الغاز الحيوي بين ($249-970 \text{ I}_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS}$) وناتج الميثان بين ($132-481 \text{ I}_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS}$)، وتراوح تركيز CH_4 في الغاز الحيوي بين 46.2 و 57.6 %، أما النسبة المتبقية فكانت بأغلبيتها غاز CO_2 . كان معدل إنتاج الميثان من SP و ST مرتفعاً حيث بلغ ($430 \text{ I}_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS}$) و ($481 \text{ I}_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS}$) على التوالي. ازدادت إنتاجية الميثان بازدياد نسبة SP أو ST في الخليط وكانت النسبة المثالية للتخمير المشترك في الخليط المختبرة في الخليط 70% رؤوس جذور شوندر سكري مع مخلفات الماشية ونباتات الطاقة، بمعدل لإنتاج الميثان ($447 \text{ I}_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS}$)، وبمعدل زيادة للميثان المقيس 6% بالمقارنة مع الميثان حسابياً. أدى تجفيف SP و ST إلى انخفاض إنتاج الميثان بنسبة من 30 إلى 40%. وقد أثبتت الدراسة أن مخلفات صناعة الشوندر السكري تعد مناسبة جداً للهضم اللاهوائي وإنتاج غاز الميثان.

الكلمات المفتاحية: الغاز الحيوي، الميثان، الهضم اللاهوائي، نباتات الطاقة، مخلفات الماشية، نقل الشوندر السكري، رؤوس جذور الشوندر.

⁽¹⁾ مدرس، قسم الهندسة الزراعية، جامعة فيينا للمصادر الطبيعية والعلوم التطبيقية، فيينا، النمسا.

⁽²⁾ مدرس، قسم الهندسة الريفية، كلية الزراعة، جامعة دمشق، ص.ب. 30621، سورية.

Anaerobic digestion of By-Products from Sugar Processing - Influence of Co-Fermentation with Animal Manure and Energy Crops for Methane Productivity

V. Kryvoruchko⁽¹⁾ and R. Al Afif⁽²⁾

ABSTRACT

Anaerobic digestion (AD) is a promising option for environmentally friendly recycling of agricultural by-products. However, an overloading of digester with sugar might cause inhibition of anaerobic digestion processes. The aim of the present study was to investigate the AD of sugar beet pulp together with cattle manure and energy crops. Eudiometer batch experiments were conducted with laboratory-scale digesters to evaluate the performance of anaerobic digestion of by-products from sugar beet processing [pressed beet pulp silage (SP) and beet-tail silage (ST)] and their mixtures in 3 percentage (30, 50 and 70 % DM) with cattle manure and energy crops (maize, sorghum and grass). The temperature was set at 38°C. Hydraulic retention time was 60 days. Biogas and methane yields ranged from 249-970 and 132-481 l_N kg⁻¹ VS, respectively. The methane content of the biogas was of 46.2-57.6%, the remaining being principally CO₂. The specific methane yields of SP and ST were high with amount of 430 and 480 l_N kg⁻¹ VS, respectively. Methane production increased with the increasing proportion of SP or ST in the mixtures. The average yield of methane was optimal for cattle manure, energy crops and 70% ST mixture. The drying process decreases the biogasification of SP and ST from 30 to 40 %. In general, sugar beet by-products are well digestible and are valuable addition for biogas production.

Key words: Biogas, Methane, Anaerobic digestion, Energy crops, Cattle manure, Pressed beet pulp, Beet-tail.

⁽¹⁾ Division of Agricultural Engineering, Department of Sustainable Agricultural Systems, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Peter-Jordan Strasse 82, A-1190 Vienna, Austria

⁽²⁾ Department Of Rural Engineering, Faculty Of Agriculture, Damascus University, P.O. Box: 30621, Syria

المقدمة

يعدُّ الغاز الحيوي الناتج عن الهضم اللاهوائي للنباتات والمخلفات العضوية الحيوانية والصناعية، مصدراً للطاقة المتجددة. إنتاج الميثان من خلال الهضم اللاهوائي سوف يعود بالفائدة على المجتمع كونه أحد مصادر الطاقة النظيفة التي تسهم في الحد من مشكلة ارتفاع حرارة الكون والمطر الحامضي [14]. ويمكن للزراعة أن تسهم في تحقيق أهداف بروتوكول كيو تونو عن طريق الحد من انبعاث غاز CH_4 و N_2O الناتج عن تفسخ المخلفات العضوية، وذلك بواسطة تخميرها في وحدات إنتاج الغاز الحيوي واستخدام الميثان في توليد الطاقة [4].

ينتج عن الشوندر السكري المستخدم في صناعة السكر مخلفات عدة تتمثل بنقل الشوندر (SP) ورؤوس الجذور (ST) الناتجة من فصل أجسام الشوندر السكري في أثناء عملية الإعداد والتحضير، وكانت هذه المخلفات تستعمل بشكل أساسي علفاً للحيوانات، وقد أدى تناقص عدد رؤوس الماشية في النمسا، إلى قلة الطلب على هذه المنتجات. ويجري حالياً البحث عن طرائق بديلة للإستفادة منها. يمثل إنتاج الطاقة من مخلفات صناعة السكر (SP و ST) بواسطة التخمير اللاهوائي في منشآت الغاز الحيوي إمكانية ممتازة للإستفادة من هذه المخلفات، حيث لا يحتاج استخدامها في منشآت الغاز الحيوي إلى معالجة، كما أن العائد الناتج من استخدامها كعلف تتناقص أهميته في ظل تصاعد أسعار الطاقة نتيجة لزيادة الطلب عليها.

أجريت العديد من الدراسات المتعلقة بإنتاج الغاز الحيوي من مخلفات صناعة السكر (SP و ST) [1] [29]. إلا أن زيادة تحميل المخمر بالمواد السكرية يمكن أن يسبب عرقلة لعملية الهضم اللاهوائي ولانترال هناك بعض المواضيع المتعلقة بتحديد مواصفات التخمر والقدرة على تكوين الغاز الحيوي تحتاج إلى دراسة، كأتمثلة نسب خلط هذه المخلفات مع نباتات الطاقة والمخلفات الحيوانية، ودراسة تأثير جفاف المخلفات في قدرتها على إنتاج غاز الميثان.

هدف البحث إلى تحري إمكانية استخدام مخلفات صناعة السكر (SP و ST) في محطات إنتاج الغاز الحيوي. وتناول المحاور الرئيسية الآتية:

- تحري الإنتاج الأعظمي للغاز الحيوي والميثان من تفل ورؤوس الشوندر السكري.
- أمثلة التخمر المشترك لنقل ورؤوس الشوندر السكري مع نباتات الطاقة ومخلفات المواشي.
- دراسة تأثير جفاف تفل ورؤوس الشوندر السكري في إنتاجية الميثان.
- تقييم نوعية الغاز الحيوي الناتج.

مواد البحث وطرقه

مول البحث من قبل الشركة النمساوية لصناعة السكر والنشاء AGRANA، وأجريت التجارب في مخابر قسم الهندسة الزراعية التابعة لجامعة فيينا للمصادر الطبيعية والعلوم التطبيقية، فيينا، النمسا.

1- العينات:

أُخذت عينات تفل الشوندر السكري ورؤوس الجذور من صوامع الشركة النمساوية لصناعة السكر والنشاء AGRANA، وجليت عينات سيلاج الذرة من الصنف Baxter من مركز التطوير والتنمية في Haidershofen، كما جُلبت عينات الذرة البيضاء (sorghum) نوع SUSU من منطقة Marchfeld. وأُخذت عينات عشب المروج من منطقة جبال الألب. أما عينات مخلفات المواشي فقد أُخذت من مخلفات الأبقار التي قدم لها نظام غذائي متوازن مكون من سيلاج الأعشاب، وسيلاج الذرة، والتبن. جمعت هذه العينات من حظائر تربية الأبقار في منطقة Marchfeld في النمسا، والباديء المستخدم في التجربة ناتج عن التخمير اللاهوائي لسيلاج دوار الشمس والذرة والخضار في مخمر أفقي حيث جمع من الجزء الأخير من وحدة التخمير بواسطة أداة خاصة موصولة مباشرة إلى خزان مدفاً سعته 50 ليترًا مملوء بغاز الأرغون لضمان شروط الهضم اللاهوائي.

أجريت تحاليل على العينات قبل وضعها في المخمرات وذلك وفقاً لإجراءات التحليل القياسية [23] وشملت: المادة الجافة (DM)، البروتين الخام (XP)، الألياف (XF)، السيليلوز (Cel)، الهيمي سيليلوز (Hem)، النشاء (XS)، السكر (XZ)، الليغنين (ADL)، الدهن الخام (XL)، الرماد (XA) والنيتروجين الحر المستخرج (XX). تم قياس ناتج الطاقة الإجمالي (GE) ميغا جول لكل كيلو غرام من المادة الجافة باستخدام جهاز قياس الطاقة الحرارية calorimeter.

2- تحديد الخليط المثالي للتخمير اللاهوائي:

لتحديد الخليط المثالي لتفل رؤوس الشوندر السكري مع نباتات الطاقة ومخلفات المواشي للحصول على الميثان، تمت تجربة مجموعتين من الخلائط، الأولى مع تفل الشوندر (SP)، والثانية مع رؤوس الجذور (ST) وتم اختيار مواد هذه الخلائط حسب المواد المستخدمة بشكل واسع في منشآت الغاز الحيوي العملية. والنسب للمواد المضافة في كل خلطة وردت في الجدول (1).

الجدول (1) خلطات العينات وكمياتها التجريبية

الخلطة	DM						FM						
	ST [%]	SP [%]	CM [%]	MZ [%]	SU [%]	GR [%]	ST [g]	SP [g]	CM [g]	MZ [g]	SU [g]	GR [g]	IM [g]
1	0.0	30.0	20.6	16.2	16.0	17.2	0.0	5.5	10.1	2.8	4.7	4.3	399.0
2	0.0	48.3	15.6	12.2	11.9	11.9	0.0	8.4	7.3	2.0	3.3	2.8	400.0
3	0.0	69.5	9.0	7.1	7.0	7.3	0.0	12.4	4.3	1.2	2.0	1.8	399.7
4	29.1	0.0	20.8	16.7	16.2	17.2	13.5	0.0	10.1	2.8	4.6	4.2	401.0
5	49.1	0.0	15.4	12.0	11.8	11.7	22.4	0.0	7.3	2.0	3.3	2.8	401.0
6	68.4	0.0	9.3	7.6	7.4	7.3	30.3	0.0	6.53	1.2	2.0	1.7	402.5

SP =تفل الشوندر السكري؛ ST=رؤوس جذور الشوندر السكري؛ CM=مخلفات الماشية؛ MZ=سيلاج ذرة؛ SU = سيلاج ذرة بيضاء؛ GR =عشب مروج IM = البادىء؛ DM=مادة جافة؛ FM=مادة طازجة

3- اختبارات الهضم اللاهوائي:

أجريت تجارب تحري الإنتاج الأعظمي للغاز الحيوي والميثان من تفل ورؤوس الشوندر السكري ومخلفات الماشية ونباتات الطاقة وخلاتها في مجموعة هواضم لاهوائية (إديومتر) سعة كل منها واحد ليتر، في درجة حرارة 38°C مدة 60 يوماً. تمت اختبارات الهضم اللاهوائي لقياس الميثان الكامن في العينات بحسب [31] VDI 4630 و 8-38414 DIN [15]. تتألف كل وحدة تخمير لاهوائي من ستة هواضم توضع ضمن حمام مائي بدرجة حرارة التجربة، وموصولة بأوعية توازن، كل هاضم مزود بخلاط مغناطيسي ومخرج لجمع الغاز الناتج عن عملية التخمير. صنعت وحدات التخمير اللاهوائي المخبرية من قبل شركة SELUTECH GmbH, Germany [25].

كررت عملية قياس حجم الميثان الناتج ثلاث مرات لكل عينة، وجرى تحريك العينات داخل الهاضم مدة عشر دقائق كل ثلاثين دقيقة. وجمع الغاز الحيوي المنطلق في أوعية التوازن وروقب بشكل يومي. جرت عملية جمع الميثان في الشروط النظامية وذلك لإمكانية مقارنة هذه النتائج لاحقاً. قيس حجم الغاز الحيوي الناتج من البادىء بشكل مستقل، وطرحت كميته من كمية الغاز الحيوي الناتج من تخمر العينات مع البادىء وذلك للوقوف على الكمية الفعلية للغاز الناتج من العينات. اختبرت ست نسب من خلطات العينات، كما هو موضح في الجدول 2. كل مزيج من العينات تم تخميره مع g (FM) 400 من البادىء. ولمتابعة التأكد من تأثيرات التخمير الممكنة في خلطات مواد التخمير جرى تخمير كل مكون من الخليط بشكل منفرد. قيست قيم pH كل 2-3 أيام خلال مدة الهضم. كما حُلل الحمض الدهني السريع التطاير باستخدام الكروماتوغرافيا الغازية (GC-Carlo Erba 5000, colon: DB-FFAP 15 m long; 0,53 mm ID; 1µm layer) في بداية التجارب وقبل نهايتها. وأُنجزت عملية تحري نوعية الغاز الحيوي كل ثالث وخامس يوم، وقيس حجمه في الشروط النظامية، درجة الحرارة 273K وضغط

جوي 1013 ميلي بار. حُلل غاز الميثان باستخدام جهاز Dragger X-am 7000 NDIR analyzer (ارتياح القراءة $\pm 1-3\%$)، قيس حجم الغاز الحيوي والميثان في ليتر نظامي لكل كيلو غرام من المادة العضوية في المادة الجافة ($1_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS}$). وقيس حجم H_2S في جهاز السحب نوع Dragger X-am 7000 (ارتياح القراءة: $\pm 5-10\%$)، استخدم جهاز Dragger tubes Type 5/b ammonia لقياس تركيز NH_3 (مجال القياس ppm 100-5؛ ارتياح القراءة: $\pm 10-15\%$) [16].

حُسب معامل كفاءة طاقة الهضم اللاهوائي (η) لكل عينة بعد عملية الهضم اللاهوائي، هذا العامل يساوي معدل الطاقة التي حصلنا عليها من الميثان في الغاز الحيوي من القيمة الإجمالية للطاقة الحرارية والتي تعني المحتوى الحراري (الإنتالبي) الناتج عن الاحتراق الكلي للوقود عندما يتحول مجمل الكربون إلى CO_2 ومجمل الهيدروجين إلى H_2O . حُسبت طاقة الميثان في الغاز الحيوي بالقيمة الحرارية العليا للميثان $H_0 = 55.497 \text{ MJ/kg CH}_4$ وبالكثافة ($\rho = 0.717 \text{ kg m}^{-3}$) عند درجة الحرارة 25°C والضغط الجوي 1.0132 بار [9]. وقد تتبأ (Friedl, et al,) [17] بالقيمة الحرارية للوقود الحيوي من تركيب العناصر.

من أجل اختبار تأثير جفاف تفل الشوندر السكري ورؤوس جذوره في المقدرة النوعية لتكوين الميثان. أُجري التجفيف في درجة ثابتة 104 وخلال 24 ساعة وحتى ثبات الوزن.

4- التحليل الإحصائي:

حللت المعطيات إحصائياً باستخدام البرنامج الإحصائي SPSS, version 11.5 [26] لخصت البيانات بواسطة الإحصاء الوصفي. واستخدم الانحراف المعياري والتوزيع التكراري للبيانات في بناء المنحنيات التراكمية. قورنت النتائج باستخدام أقل فرق معنوي عند مستوى احتمال 0.05.

النتائج والمناقشة

يُظهر الجدول (2) نتائج تحليل العينات قبل وضعها في المخمرات إلى مركباتها ونتاج الطاقة الإجمالي، وتبين النتائج أن محتوى السيليلوز والبروتين في رؤوس الشوندر كان أعلى بكثير منه في تفل الشوندر.

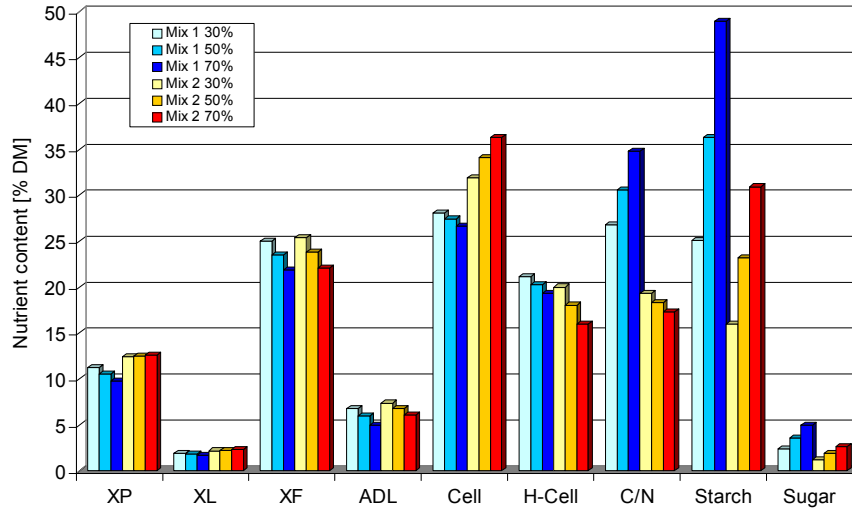
وأن النسبة C/N والسكر والنشاء عال نسبياً في تفل الشوندر بالمقارنة مع رؤوس جذوره التي تحتوي على نسبة مثلى للنسبة C/N (15.3) من وجهة نظر التخمر اللاهوائي، حيث تقع النسبة المثلى بين 12 و30 [22]. عندما تتخفص النسبة عن 10 يزداد معدل النشادر ويكون له تأثير سام في بكتريا الميثان. ولكي تتزود بكتريا الميثان بالمادة الغذائية الكافية يجب أن تكون نسبة C:N:P:S هي 600:15:5:1 [18].

الجدول (2) نتائج التحاليل التي أجريت على العينات قبل بدء التجارب

النوع	XP %	XL %	XF %	XA %	XX %	ADL %	Cel %	H- Cel %	C %	GE MJ/ kgVS	XS %	Sugar %	C/N	DM %	VS %
	DM	DM	DM	DM	DM	DM	DM	DM	DM		DM	DM		FM	DM
مخلفات ماشية	14.2	1.6	22.2	20.5	41.5	15.7	27.8	17.4	46.6	21.8	0.0	n.n.	9.9	9.7	7,71
سبيلاج الذرة	7.6	2.4	24.0	3.56	62.5	2.9	24.1	31.8	46.9	18.8	24.7	0.6	30.2	32.2	96.4
الذرة البيضاء	10.9	1.8	37.2	9.0	41.0	6.56	37.5	22.4	49.3	18.4	1.7	0.5	27.1	19.1	91.0
عشب المروج	16.3	2.6	28.0	9.7	42.0	6.5	28.1	19.3	47.1	19.2	n.n	0.1	16.6	22.4	92.0
تفل الشوندر	8.7	1.5	19.5	5.5	64.8	3.7	25.6	18.0	49.4	18.8	67.0	7.0	40.8	30.4	94.5
رؤوس الشوندر	12.8	2.5	18.9	28.7	37.1	4.8	40.5	12.1	34.5	15.3	63.5	4.0	15.3	11.8	71.3

=ADL= النيتروجين الحر المستخرج؛ =XP= بروتين خام؛ =XL= دهن خام؛ =XF= فيبر خام؛ =XA= رماد؛ =XX= النيتروجين الحر المستخرج؛ =ADL= اللغنين؛ =Cel= سيليلوز؛ =H-Cel= هيمي سيليلوز؛ =XS= النشاء؛ =C/N= نسبة N؛ =DM= المادة الجافة؛ =VS= المادة العضوية في المادة الجافة؛ =GE= الطاقة الإجمالية؛ =FM= مادة طازجة

حُسب تركيب المواد المحتواة في الخلطات المختبرة بناءً على تركيب المكونات الإفرادية لعينات الخلطات.



Mix 1=خليط تفل الشوندر السكري مع نباتات الطاقة ومخلفات الماشية؛ Mix 2=خليط رؤوس الشوندر السكري مع نباتات الطاقة ومخلفات الماشية.

الشكل (1) تركيب المواد في الخلطات المختبرة

يظهر من الشكل (1) أن تركيب مواد خلطة رؤوس الشوندر السكري أكثر ملائمة للهضم اللاهوائي من خلطة تفل الشوندر، ويعود ذلك إلى أن محتوى المواد الأساسية لتكوين الميثان [6] مثل البروتين والدهم الخام والسيليلوز في خلطة رؤوس الشوندر أعلى منها في خلطة تفل الشوندر. كما أن نسبة C/N تقع ضمن المجال المثالي.

لتحري الإنتاج الأعظمي للغاز الحيوي والميثان أُجريت أربع عشرة تجربة خُصِّصت ثمان منها لتحري التخمر المنفرد للعينات وتأثير التجفيف في إنتاجيته. وخصِّصت التجارب الست الأخرى لتحري تأثير التخمر المشترك لتفل الشوندر ورؤوس جذوره بنسب (30 و 50 و 70%) مع مخلفات الماشية وسيلاج الذرة والذرة البيضاء وعشب المروج في إنتاج الغاز الحيوي والميثان.

1- إنتاج الغاز الحيوي والميثان من التخمر الإفرادي للعينات:

يبين الجدول (3) ناتج الغاز الحيوي والميثان من الهضم اللاهوائي للعينات المختبرة والانحراف المعياري لثلاثة مكررات. تراوحت كمية الميثان والغاز الحيوي الناتجة من الهضم اللاهوائي للعينات كل على حدة بين ($132-481 I_N$ و $249-970 I_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS}$) على التوالي.

الجدول (3) الغاز الحيوي والميثان الناتج من الهضم اللاهوائي للعينات المختبرة وختلاتهم، والانحراف المعياري لثلاثة مكررات، ومعامل كفاءة طاقة الهضم اللاهوائي.

العينات	ناتج الغاز الحيوي [$I_N \text{ (kg VS)}^{-1}$]			ناتج الميثان [$I_N \text{ (kg VS)}^{-1}$]			η %
	Mean	n	S.D	Mean	n	S.D	
مخلفات ماشية	249	3	2.6	132	3	0.5	24
سيلاج الذرة	782	3	86.8	431	3	42.5	84
سيلاج الذرة البيضاء	608	3	26.8	348	3	14.9	85
عشب المروج	668	3	15.5	385	3	9	64
تفل الشوندر	845	3	33.3	430	3	18.1	85
رؤوس الشوندر	970	3	68.7	481	3	32.4	89
Mix 1 30% SP	372	3	27.1	211	3	16.1	nn
Mix 1 50% SP	405	3	15.5	231	3	8.1	nn
Mix 1 70% SP	517	3	9.2	296	3	16.1	nn
Mix 2 30% ST	668	3	24.0	358	3	10.2	nn
Mix 2 50% ST	707	3	23.3	387	3	14.3	nn
Mix 2 70% ST	812	3	50.0	447	3	24.9	nn
تفل شوندر جاف	641	3	21.4	296	3	13.2	nn
رؤوس شوندر جافة	506	3	27.9	274	3	14.9	nn

S.D = الانحراف المعياري؛ n = عدد المكررات؛ nn = غير مقيس؛ η = معامل كفاءة طاقة الهضم اللاهوائي؛ M1 = عشب المروج والذرة ومخلفات الماشية والذرة البيضاء + X% تفل الشوندر السكري؛ M2 = عشب المروج والذرة ومخلفات الماشية والذرة البيضاء + X% رؤوس جذور الشوندر السكري.

وكانت كمية الغاز الحيوي والميثان الناتجان عن مخلفات الماشية الأقل مقارنة مع الكمية الناتجة من باقي العينات (فرق معنوي > 0.05). أجرى كل من Al Afif [3]، [11] Brachtl، [28] Kozmiensky و [33] Wellinge تجارب هضم لاهوائي على مخلفات الماشية وحصلوا على كمية غاز حيوي تراوحت بين $(200-300 \text{ l}_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS})$ ، كما حصل Braun [12] على إنتاج للغاز الحيوي من مخلفات الماشية تراوح بين $(140-266 \text{ l}_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS})$. وعليه أعطت التجربة معدلاً جيداً للغاز الحيوي من مخلفات الماشية $(249 \text{ l}_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS})$ وازدياد محتوى اللغنين (ADL) في مخلفات الماشية 15.7% ربما يفسر ضآلة المقدرة على إنتاج الميثان بالمقارنة مع ما ينتج من ثقل الشوندر السكري. ورؤوس جذوره والذرة وعشب المروج والذرة البيضاء.

يلاحظ أن أعلى معدل لإنتاج الميثان والغاز الحيوي كان من رؤوس جذور الشوندر $(481 \text{ l}_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS})$ و $(970 \text{ l}_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS})$ على التوالي. يمكن أن يفسر ذلك بارتفاع محتوى الدهن الخام والسيليلوز في رؤوس الشوندر مقارنةً بباقي العينات المختبرة إذ إن تركيب المخلفات العضوية (الحيوانية والنباتية) وقابليتها للتحلل البكتيري هما العاملان الأساسيان في إنتاج الميثان، كما يؤثر البروتين الخام والدهن الخام والألياف والسيليلوز والهيميسيليلوز والرماد والسكر بشكل مباشر في تكوين الميثان [5] [6] [8]. تدل النتائج أيضاً على معدل جيد من الميثان الناتج من SP و ST مرتفع حيث بلغ $(430 \text{ l}_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS})$ و $(481 \text{ l}_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS})$ على التوالي بالمقارنة بما توصل إليه Oechsner [24] الذي أجرى تجارب هضم لاهوائي على ثقل الشوندر وحصل على $(400 \text{ l}_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS})$ ، وما توصل إليه كل من Keymer [20] و Weiland [32] من تخمر رؤوس الشوندر السكري لاهوائياً حيث حصلوا على غاز الميثان بمقدار تراوح بين $(75-96 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{FM}})$. وكانت كميات الميثان التي تم الحصول عليها من مخلفات الماشية وسيلاج الذرة والذرة البيضاء والعشب ضمن المعدلات المعروفة من المصادر [6] [18]. تراوحت قراءات قياس رقم الحموضة pH في أثناء التخمر اللاهوائي لجميع العينات قرابة 7.1 في بداية التجارب حتى 7.7 إلى 8.2 في نهاية التجارب. علماً أن معدل الحموضة الأمثل لنشاط بكتريا الميثان يقع بين 6.4 و 10. وخروج قيمة pH عن هذا المجال يؤدي إلى عرقلة في التخمر وزيادة تركيز CO_2 في الغاز الحيوي [7]، وعليه أجريت التجارب في وسط حامضي مثالي لنشاط بكتريا الميثان. أظهرت النتائج أيضاً انخفاضاً في تركيز VFA قرب نهاية زمن التخمر كما أن محتوى حمض الأسيتيك كان أقل من (1000 mg/l) ، ومحتوى حمض البروبيونيك أقل من (200 mg/l) ، وهذا يعطي دليلاً إضافياً على أن عملية التخمر اللاهوائي تسير دون عرقلة. أظهرت العديد من الدراسات Björnsson [10]، Ahring [2]، Harmsen [19] أن محتوى الحامض الدهني المتطاير يعد مؤشراً جيداً على توازن عملية الهضم اللاهوائي. لأن عملية الهضم اللاهوائي تسير بشكل

مثالي إذا كان محتوى حمض الأسيتيك أقل من (1000 mg/l)، ومحتوى حمض البروبيونيك أقل من (200 mg/l). وعلى العكس إذا تجاوز المحتوى الكلي للحمض الدهني (3000 mg/l) أو كان محتوى البروبيونيك أعلى من (300 mg/l) فإن هذا يدل على وجود عرقلة في عملية التخمر اللاهوائي [33]. وأشار Uribe Juan [30] إلى أن التبدلات في pH تحدد تطور عملية التخمر، من واقع تأثيرها في التفاعلات البيوكيميائية.

2- فعالية التحلل في تحول الطاقة:

من أجل معرفة فعالية التخمر اللاهوائي في تحول الطاقة تم قياس الطاقة الإجمالية الناتجة من كل من العينات ثم قورنت مع الطاقة الناتجة من الميثان الذي تم الحصول عليه تجريبياً. أكدت المقارنة وجود اختلاف بين الطاقة التي تم الحصول عليها من الميثان في الغاز الحيوي والقيمة الإجمالية للطاقة، حيث كان معامل كفاءة طاقة الهضم اللاهوائي (η) 24% لمخلفات الماشية و84% للذرة و85% لتفل الشوندر و89% لرؤوس الشوندر و64% للذرة الصفراء و73% لعشب المروج (جدول3). تظهر هذه النتائج إمكانية الحصول على المزيد من الميثان من الهضم اللاهوائي للعينات، ومن ثم فإن إجراء تجارب إضافية ضروري لزيادة إنتاج الميثان مثل تحسين عمليات المعالجة الأولية للعينات وإضافة خلائط الأنزيمات وأمثلة معدل تغذية المواد العضوية إلى المخمر.

3- تأثير جفاف تفل الشوندر ورؤوس جذوره في إنتاج الميثان:

أجري اختبار لتأثير جفاف سيلاج تفل الشوندر السكري ورؤوس الجذور في المقدرة النوعية لإنتاج الميثان، يُظهر الجدول (3) أن عملية تجفيف تفل الشوندر ورؤوس جذوره أدت إلى هبوط نسبة الميثان الناتجة من الهضم اللاهوائي بنسبة 30% و44% على التوالي، ويمكن أن يُفسر ذلك بانخفاض المقدرة على إنتاج الميثان نتيجة لتبخر جزء من الحموض الدهنية القابل للتبخر (VFA) في أثناء عملية التجفيف.

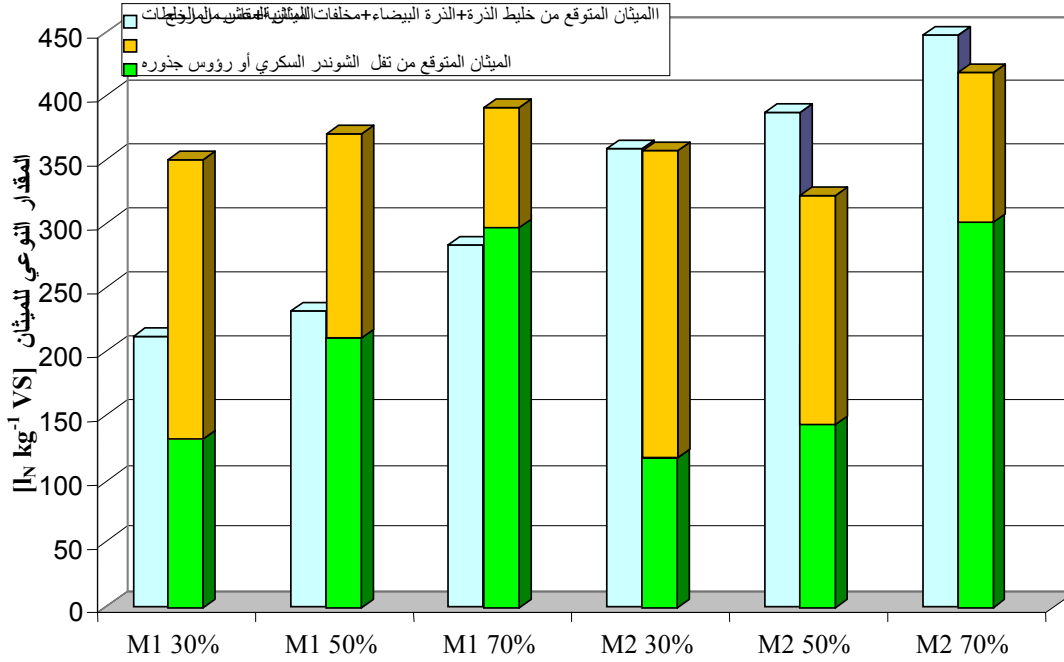
4- تأثير التخمر المشترك في إنتاج الميثان:

يوضح الجدول (3) أيضاً تأثير التخمر المشترك لمخلفات الماشية وسيلاج الذرة والذرة البيضاء وعشب المروج مع تفل الشوندر السكري (Mix 1) أو مع رؤوس جذوره (Mix2) في الإنتاج النوعي للميثان والغاز الحيوي. تراوح حجم الميثان الناتج عن خلائط Mix1 بين (211-296 I_N kg⁻¹ VS) وخلائط Mix2 بين (358-447 I_N kg⁻¹ VS). قيس أعلى معدل لإنتاج الميثان (447 I_N kg⁻¹ VS) من الخليط Mix 2 الذي يحتوي على 70% رؤوس شوندر. تدل النتائج على ازدياد إنتاج الغاز الحيوي والميثان بازدياد نسبة مخلفات الشوندر السكري في الخلطات. وكمية الميثان الناتج من خلائط Mix 1 كانت أقل في خلائط Mix2. يعود ذلك إلى انخفاض القدرة على إنتاج الميثان من تفل

الشوندر السكري مقارنة مع رؤوس الشوندر. إن إضافة الكربوهيدرات سهلة التحلل (السكر والنشاء) إلى العينات يمكن أن تخفض إمكانية التخمر لجميع مكوناتها ولاسيما البروتين الخام واللّيف الخام، وهذه العملية العكسية تسمى فتور الهضم [21] وعليه يمكن أن تكون إضافة تفل الشوندر السكري الغني بالسكر والنشاء إلى خليط عشب المروج والذرة ومخلفات الماشية والذرة البيضاء الغني بالألياف سبباً في انخفاض تخمر الخليط Mix 1 بالمقارنة مع تخمر الخليط Mix 2.

5- فعالية التخمر المشترك:

يبين الشكل (2) إنتاج الميثان المقيس من التخمر اللاهوائي للخليط 1 و2 بنسب (30، 50، 70%) من تفل الشوندر أو رؤوسه، ومقارنته مع الإنتاج المتوقع للميثان من هذه الخلطات.



الشكل (2) الميثان محسوباً ومقيساً من الهضم اللاهوائي لخلطات العينات المختبرة

وحساب الميثان المتوقع الحصول عليه من الخلطات من مجموع كميات الميثان الناتجة من التخمر المنفرد للمواد الداخلة في تركيبها. تدل النتائج على أن الإنتاج الحقيقي للميثان المقيس من الخلطات Mix 1 كان أقل من المتوقع الحصول عليه. وربما يعود ذلك كما

ذكرنا أعلاه إلى زيادة محتوى السكر والنشاء الموجودة في تفل الشوندر والتي يمكن أن تكون قد تسببت في تثبيط عملية الهضم. وبناء على ذلك تشير النتائج الأولية إلى عدم وجود فعالية تستدعي القيام بتجارب إضافية لتحري الميثان الناتج عن التخمر المشترك للخلائط Mix 1. بينما أظهرت الخلطات Mix 2 مع سيلاج رؤوس جذور الشوندر السكري (ST) تأثيرات تخمرية طفيفة لدى إضافة 30% و 50% من ST تراوحت بين 1 - 2%. وعند إضافة 70% من ST زاد إنتاج الميثان المقيس بمعدل 6% بالمقارنة مع الميثان المتوقع الحصول عليه حسابياً.

3- نوعية الغاز الحيوي:

نظراً لأن الميثان هو عامل الطاقة الحقيقي في الغاز الحيوي. لذلك يعد تركيز الميثان في الغاز الحيوي مؤشراً لاقتصاديات إنتاجه. يبين الجدول (4) تركيز الميثان وكبريت الهيدروجين والأمونيا في الغاز الحيوي. تراوح تركيز CH₄ في الغاز الحيوي الناتج من العينات المختبرة بين 46.2-57.6%.

الجدول (4) محتوى الميثان، الهيدروجين، كبريت الهيدروجين، الأمونيا في الغاز الحيوي

العينات	CH ₄ [Vol %]			H ₂ S [ppm]			NH ₃ [ppm]		
	mean	n	±	mean	n	±	mean	n	±
مخلفات ماشية	53.0	7	8.8	267	6	112	26	3	11
سيلاج الذرة	55.1	7	3.7	214	6	58	29	3	16
سيلاج الذرة البيضاء	57.2	7	4	213	6	49	29	3	13
عشب المروج	57.6	7	4.2	281	6	149	32	3	30
تفل الشوندر	50.9	7	7.1	321	6	74	37	3	11
رؤوس الشوندر	49.6	7	5	174	6	100	30	3	7
Mix 1 30%	56.7	7	3.7	209	6	23	33	3	1
Mix 1 50%	57.0	7	2.9	362	6	51	35	3	4
Mix 1 70%	57.3	7	3.3	176	6	97	32	3	10
Mix 2 30%	53.6	7	5.4	358	6	118	16	3	8
Mix 2 50%	54.7	7	7	387	6	45	16	3	13
Mix 2 70%	55.0	7	7.3	350	6	82	17	3	10
تفل شوندر جاف	46.2	7	12.8	250	6	127	41	3	38
رؤوس شوندر جافة	54.2	7	5.1	355	6	99	31	3	20

وبلغ متوسط تركيز CH₄ في الغاز الحيوي 53.6%، أما النسبة المتبقية فإن معظمها غاز CO₂، تم قياس أعلى تركيز للميثان في الغاز الحيوي من عشب المروج 57.6%. ويعود ذلك إلى ارتفاع محتوى البروتين الخام (DM%16.3) والدهن الخام (DM%28.0) فيه بالمقارنة مع باقي العينات المختبرة. أشار الباحثان Buswell و Sollo إلى أن تركيز الميثان في الغاز الحيوي الناتج عن هضم الدهن الخام 71% في حين بلغ تركيز الميثان في الغاز الحيوي الناتج عن هضم البروتين الخام 60% [13]. أدت زيادة نسبة تفل الشوندر في الخليط M1 ورؤوس الشوندر في الخليط M2 إلى

ارتفاع تركيز الميثان في الغاز الحيوي، وكان متوسط محتوى كبريت الهيدروجين في الغاز الحيوي (291 ppm) ومتوسط محتوى الأمونيا (28 ppm) وهي ضمن الحدود الطبيعية. ومن ثم كانت نوعية الغاز الحيوي الناتج جيدة.

الاستنتاجات

1. يعدُّ ثقل الشوندر السكري ورؤوس جذوره مواد مناسبة جداً لإنتاج الميثان، بمعدل إنتاج (430 l_N kg⁻¹ VS) و (481 l_N kg⁻¹ VS) خلال 60 يوماً على التوالي.
2. النسبة المثالية للتخمير المشترك في الخلائط المختبرة كانت في الخليط 70% رؤوس جذور شوندر سكري مع مخلفات الماشية ونباتات الطاقة، بمعدل إنتاج الميثان (447 l_Nkg⁻¹ VS)، وبمعدل زيادة للميثان المقيس 6% بالمقارنة مع الميثان الذي حصلنا عليه حسابياً.
3. أدى تخفيف ثقل الشوندر السكري ورؤوس جذوره إلى انخفاض إنتاج الميثان بنسبة من 30 إلى 40%.
4. لم تؤد إضافة ثقل الشوندر السكري إلى خليط نباتات الطاقة ومخلفات الماشية إلى تأثيرات إيجابية في المقدرة على إنتاج الميثان. لذلك لا توجد فعالية ذات قيمة لإجراء تجارب إضافية لتحري الميثان الناتج عن التخمير المشترك لخلائط ثقل الشوندر السكري مع نباتات الطاقة ومخلفات الماشية.
5. تظهر نتائج دراسة فعالية التخمير اللاهوائي في تحول الطاقة إمكانية الحصول على المزيد من الميثان من الهضم اللاهوائي للعينات منفردة، ومن ثم فإن إجراء تجارب إضافية أمر ضروري لتحسين إنتاج الميثان من ثقل الشوندر السكري ورؤوس جذوره ومخلفات الماشية ونباتات الطاقة.
6. يحتوي الغاز الحيوي الناتج عن الهضم اللاهوائي لثقل الشوندر السكري ورؤوس جذوره ونباتات الطاقة ومخلفات الماشية وخلانطهم على نسبة تتراوح بين 46.2-57.6% من الميثان؛ 147-387 جزءاً من المليون H₂S و 16-37 جزءاً من المليون NH₃ أما النسبة المتبقية فكانت غاز CO₂.

Acknowledgements

We thank the AGRANA and the University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, Austria for the financial support of the work. Special thanks are due to Prof. Dr. Thomas Amon for his continues help.

المراجع REFERENCES

1. Abhay Koppar and Pratap Pullammanappallil. (2007). Single-stage, batch, leach-bed, thermophilic anaerobic digestion of spent sugar beet pulp, *Bioresource Technology*, In Press.
2. Ahring, B. K., Sandberg, M., and Angelidaki, I. (1995). Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 43, 559-565.
3. Al Afif, R., Amon T. (2007). Biogas production from olive pulp and cattle manure – Effect of co-fermentation and enzymes on methane productivity, Damascus University journal for the Agricultural sciences (in press).
4. Amon, T., Jeremic, D., and Boxberger, J. (2001). Neue Entwicklungen der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung in Österreich, 465.
5. Amon, T., Kryvoruchko, V., Amon, B., Buga, S., Amin, A., Zollitsch, W., Mayer, K., and Pötsch, E. (2004). Biogaserträge aus landwirtschaftlichen Gärgütern, 21-26. BAL Gumpenstein, BMLFUW (Ed.). ISBN 3-901980-72-5.
6. Amon, T., Kryvoruchko, V., Amon, B., Moitzi, G., Lyson, D., Hackl, E., Jeremic, D., Zollitsch, W., Pötsch, E. (2003). Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Klee gras. Endbericht Juli 2003. Im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft. Forschungsprojekt Nr. 1249.
7. Angelidaki, I. and Ahring, B. K. (1994). Anaerobic digestion of manure at different ammonia loads: effect of loads, *Water Res.*, 28, 727-731.
8. Balsari, P., Bonfanti, P., Bozza, E., Sangiorgi, F. (1983). Evaluation of the influence of animal feeding on the performances of a biogas installation (mathematical model). In: Third international Symposium on Anaerobic Digestion, 14 –20 August 1983, A 20, Boston, Massachusetts, USA, 7.
9. Beitz, W., Küttner, K. H. (1987). *Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau*, 16. edition, Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York, ISBN: 3-540-18009-5
10. Björnsson, J., Murto, M., and Mattiasson, B. (2000). Evaluation of parameters for monitoring an anaerobic co-digestion process, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 54, 844-849.
11. Brachtl, E. (2000). Pilotversuche zur Cofermentation von pharmazeutischen Abfällen mit Rindergülle. Diplomarbeit. Interuniversitäres Forschungsinstitut für Agrarbiotechnologie, Abt. Umweltbiotechnologie (Ed.), A-3430 Tulln, 112 Bl
12. Braun, R. (1982). *Biogas – Methangärung organischer Abfallstoffe: Grundlagen und Anwendungsbeispiele (Innovative Energietechnik)*, Springer (Ed.). Wien, New York. 3-211-81705-0.
13. Buswell, A. M. and Sollo, F. W. (1948). The mechanism of methane fermentation, *J. Amer. chem. Soc.*, 7, 1778-1780.
14. Chynoweth, D. P. (2004). Biomethane from energy crops and organic wastes, 1, 525-530.
15. DIN 38 414-8. (1985). Bestimmung des Faulverhaltens „Schlamm und Sedimente“, Beuth Verlag (Ed.). Berlin. Dragger syfety AG and CO.KGaA. <http://www.dragger-syfety.com>

16. Friedl, A., Padouvas, E., Rotter, H. and Varmuza K. (2005). Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica Chimica Acta, Volume 544, Issues 1-2, 15 July 2005, Pages 191-198.*
17. Handreichung Biogas. (2004).
18. Harmsen, H. J. M., Van Kuijk, B. L. M., Plugge, C. M., Akkermans, A. D. L., de Vos, W. M., and Stams, A. J. M. (1998). *Syntrophobacter fumaroxidans* sp. nov., a syntrophic propionate-degrading sulfate-reducing bacterium, *J.Syst.Bacteriol.*, 48, 1383-1387.
19. Keymer, U. (2002). So rechnet sich Mais für die Biogasanlage. In: *Biogas – Strom aus Gülle und Biomasse, Top Agrar Fachbuch: 31-32. Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup.*
20. Kirchgessner, M. (1992). *Tierernährung. 8. Auflage. DLG-Verlag, Frankfurt (Main).*
21. Madigan, M. T., J. M. Martinko und J. Parker. (2001). *Mikrobiologie. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg/Berlin.*
22. Naumann, K., Bassler, R. (2004). *Methodenbuch. Band III. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. 5th ed., VDLUFA-Verlag, Darmstadt, Germany.*
23. Oechsner, H., A. Lemmer, C. Neuberg. (2003). *Versuche zur Gärbiologie und Prozesstechnik bei der Vergärung von Energiepflanzen. Biogas International Konferenz: 49-54. Augsburg.*
24. SELUTECH GmbH. (2005). *Roßbergstraße 5/7 - 72116 Mössingen-Öschingen, <http://www.selutech.de>*
25. SPSS Inc. (2005). *SPSS software, Release 11.5, SPSS Inc. Chicago (Ed.). Chicago, Illinois.*
26. Tekin, A. R. and Dalgic, A. C. (2000). *Biogas production from olive pomace, Resources, Conservation and Recycling, 30, 301-313. Elsevier Science (Ed.).*
27. Thomé-Kozmiensky, K. J. (1995). *Biologische Abfallbehandlung, 907. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik (Ed.). Berlin.*
28. Umetsu, K., Yamazaki, S. Kishimoto, T., Takahashi, J., Shibata, Y., Zhang, C., Misaki, T., Hamamoto, O., Ihara, I. and Komiyama, M. (2006). *Anaerobic co-digestion of dairy manure and sugar beets, International Congress Series, Volume 1293, July 2006, Pages 307-310*
29. Uribe, M. and Juan, M. (1993). *Evaluation of the production of biogas from the vegetative material of prickly pear, through a metanic fermentation process, Esc.de Agronomia, 51. Chile University (Ed.). Santiago, Chile.*
30. VDI 4630. (2006). *Fermentation of organic materials. Characterisation of the substrates, sampling, collection of material data, fermentation tests. Verein Deutscher Ingenieure (Ed.), VDI-Handbuch Energietechnik.*
31. Weiland, P. (1997). *Potentiale und Vorschriften bei der Cofermentation. 6. Jahrestagung Fachverband Biogas e.V.: 1-16. Kirchberg*
32. Wellinger, A. (1997). *Biogasprozess: Mögliche Probleme von A bis Z, 1-8.*

Received	2007/11/07	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2008/05/13	قبول البحث للنشر