الفصل الثالث عشر

الجوانب البيئية والاقتصادية للتقنية الحيوية الصناعية

ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC ASPECTS OF INDUSTRIAL BIOTECHNOLOGY

باربرا ج. هيرمان، فيرونيكا دورنبورج، و مارتين ك. باتيل

Barbara G. Hermann , Veronika Dornburg , and Martin K. Patel

(١٣, ١) المقدمة Introduction

يتم إنتاج المواد الكيميائية والوقود حالياً بشكلٍ حصري تقريباً من مواد البتروكيماويات الأولية المستمدة من النفط الخام والغاز الطبيعي. يمكن أن يقلل إنتاج نفس المواد الكيميائية والوقود أو المكافئ لها وظيفياً من الموارد المتجددة من الأثر البيئي، على سبيل المثال انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. وفي ضوء ارتفاع أسعار النفط؛ وكذلك أهداف الحد من الانبعاثات طويلة المدى، على سبيل المثال، هدف الاتحاد الأوروبي للحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة ١٥-٣٠٪ بحلول عام ٢٠٢٠م، يمكن أن تسهم التقنية الحيوية الصناعية (تسمى أيضاً "التقنية الحيوية البيضاء") المستخدمة لإنتاج مواد أو وقود اعتماداً على الموارد الحيوية بشدة في تحقيق أهداف الحد من الانبعاثات وكذلك نحو تقليل الاعتماد على الموارد الأحفورية المكلفة.

وهناك بالفعل الكثير من تطبيقات التقنية الحيوية لإنتاج المواد الكيميائية الدقيقة والمواد الكيميائية المتخصصة، المنطقة التي من المتوقع أن تتسع إلى حدٍ كبير على المدى القصير إلى المدى المتوسط. وفي المقابل، فإن هناك عدم يقين أكثر بشأن متى، وكيف، وإلى أي حد سوف تؤدي التقنية الحيوية أيضاً دوراً في إنتاج المواد الكيميائية الضخمة.

في السنوات الأخيرة، اتخذت خطوات مهمة في معاهد البحوث والشركات، والسياسة، بهدف تطوير وتطبيق التقنية الحيوية الصناعية في إنتاج المواد الكيميائية والوقود، مما أدى إلى توقعات عالية في المجال. وتم فتح آفاق وفرص جديدة بواسطة التقدم الأخير، ويرجع ذلك في المقام الأول إلى زيادة إنتاجيات وعائدات التخمير. ومن المتوقع تحقيق مزيد من التقدم المهم في هذا المجال، خصوصاً فيما يتعلق بالكائنات الحية الدقيقة المعدلة وراثياً.

وفي حين أن هناك توجهاً قوياً وراء هذه التطورات، فإن هناك حتى الآن فقط معلومات قليلة جداً متاحة في المجال العام على الآثار الحالية والمستقبلية الاقتصادية والبيئية والاجتماعية للتقنية الحيوية الصناعية. ركزت كل الدراسات التي تم نشرها تقريباً على منتج واحد، غالباً وقود الإيثانول [١٤، ٣٤] ولكن أيضاً على حمض البولي لاكتيك [٤، ٤٣]، وبولي هيدروكسي ألكانوات [٢، ١٥]. ومع ذلك، فإن هذه الدراسات ليست مقارنة بسهولة؛ بسبب اختلاف الافتراضات والمنهجيات. وعلاوةً على ذلك، يتم تجاهل التحسينات المستقبلية في التقنية على الرغم من أنها قد تقلل بشكلٍ كبير من الآثار البيئية، والاقتصادية، والاجتماعية. وللتغلب على هذه المشكلات فإننا نقدم ونطبق نهجاً عاماً والذي يسمح بتقدير الآثار البيئية والاقتصادية اعتماداً على المدخلات من المواد الأولية والطاقة للعملية [١١، ٢٧].

واستند اختيار المنتجات في هذا الفصل على ثلاثة معايير هي: (أ) جدوى الإنتاج عن طريق التخمير، (ب) المعلومات المتاحة عن حركيات هذه العملية، والإنتاجية، والتركيز في محلول التخمير، و(ج) إمكانية بيعها بكميات كبيرة على المدى المتوسط أو الطويل (انظر [١١، ٢٧] لمزيدٍ من التفاصيل). تمت دراسة المنتجات التالية: ١،٣-بروبان دايول (PDO)، وحمض الخليك، وحمض الأديبيك، والبيوتانول (من عملية الأسيتون-بيوتانول-إيثانول [ABE])، والإيثانول، وحمض اللاكتيك، والبولي هيدروكسي ألكانوات (PHA)، وحمض السكسينيك. وبالإضافة إلى ذلك، تم أخذ أربعة منتجات تتكون من التحويل الكيميائي اللاحق لهذه المنتجات في الاعتبار: الإيثيل لاكتات (EL)، والإيثيلين، وحمض البولي لاكتيك (PLA)، وبولي ثلاثي الميثيلين رباعي الفيثالات (PTT).

(١٣,٢) المنهجية Methodology

(١,٢,١٣) النهج العام Generic Approach

(١,١,٢,١٣) الخلفية المنهجية Methodological Background

النهج العام هو وسيلة تتيح إجراء مقارنات معيارية بين مختلف العمليات على أساس عدد محدود من العناصر. ويمكن بعد ذلك إجراء الكثير من الحسابات على أساس عدد محدود من البيانات المدخلة وقاعدة البيانات التي تقوم عليها. يتيح هذا النهج العام التقدير المسبق للجدوى الاقتصادية فضلاً عن الآثار البيئية لعمليات التقنية الحيوية والتي لا تتواجد لها بيانات المصنع التجريبي حتى الآن أو التي لا تتاح بيانات عملياتها علنياً. ويمكن تطبيق هذه الطريقة للعمليات التي تمثل الحالة الراهنة للتقنية فضلاً عن التقنية المستقبلية. ويمكن بعد ذلك مقارنة نتائج هذا النهج العام بنتائج منتجات التقنية الحيوية الصناعية التي يتم حسابها باستخدام البيانات الصناعية و/ أو ما يعادلها من البتروكيماويات.

الخطوة الأولى من النهج العام هي إعداد مخطط لسير العملية الحيوية، والتي تحول سكر التخمير إلى كيماويات التقنية الحيوية الصناعية المستهدفة. ووفقاً للمبدأ الذي اقترحه لاندوسي وليند [١٦، ٢١]، تحتوي مخططات سير العملية هذه على الوحدات النمطية القياسية (مثل التخمير، والترشيح الفائق، والتبخير). يمكن تعيين ميزان الكتلة الذي يحتوي على كميات جميع المدخلات والمخرجات على مستوى عملية الوحدة لكل مخطط سير عملية يمثل طريق منتج واحد (انظر الأقسام ١٣,٢,١,٢ و١٣,٢,١,٣). وعلى هذا الأساس، يمكن إجراء التقييم البيئي (انظر القسم ١٣,٢,٢) وتقدير التكاليف المتصلة بجميع المدخلات وتكاليف الاستثمار وحساب تكاليف الإنتاج الإجمالية (انظر القسم ١٣,٢,٣).

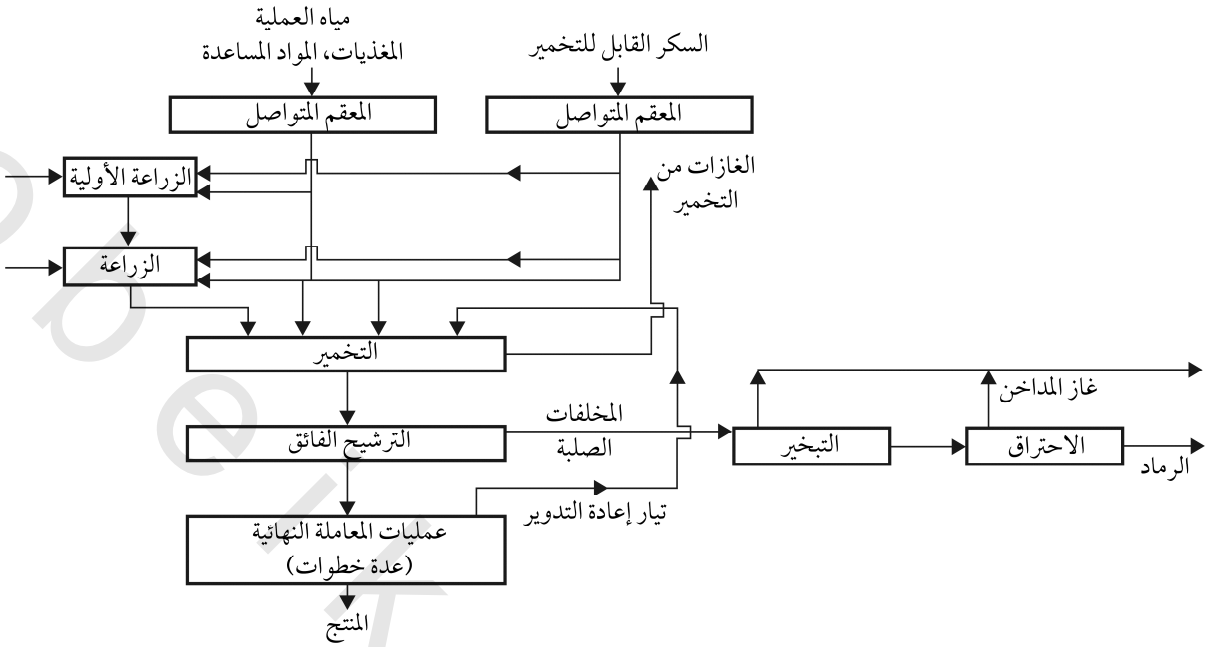
ومن أجل ضمان إمكانية المقارنة بين النتائج، فإنه يجب استخدام قاعدة بيانات مشتركة لمدخلات العملية لجميع العمليات الحسابية. وتتكون قاعدة البيانات هذه من بيانات الخلفية البيئية على إمكانية ارتفاع درجة حرارة الكرة الأرضية واستخدام الطاقة غير المتجددة وكذلك أسعار السوق للمواد الكيميائية، والعوامل المساعدة/ المرافق وسكر التخمير (انظر الأقسام ١٣,٢,٣,١ و١٣,٢,٣,٢). وكانت الوحدة الوظيفية هي طن واحد[1] من المادة الكيميائية العضوية عند بوابة المصنع. ثم يتم مقارنة هذه الوحدة الوظيفية بسهولة إلى إنتاج نفس المادة الكيميائية الحالي من البتروكيماويات أو المكافئ الوظيفي.

(١٣,٢,١,٢) تصميم العملية لطرق التقنية الحيوية الصناعية

Process Design of Industrial Biotechnology Routes

تم وضع مخططات منفصلة لسير العملية للتقنيات الحالية والمستقبلية، فيما يتعلق بكلٍ من عمليات التخمير وعمليات التجهيز النهائي لفصل وتنقية المنتج. وتتكون جميع مخططات سير العملية (المعدة على مستوى عمليات الوحدة) من الأقسام التالية (الشكل رقم ١٣,١): قطارات الزراعة والتلقيح (توفير الكائنات الحية الدقيقة)، والتخمير (تحويل سكر التخمير إلى المنتج المستهدف والمنتجات الثانوية)، والترشيح (إزالة المنتجات الثانوية الصلبة) والتجهيز النهائي (عدة خطوات، لتنقية المنتج المستهدف). ومواد المدخلات إلى النظام هي سكر التخمير، والماء، والمواد الغذائية، والمواد المساعدة، والمرافق مثل الكهرباء والبخار. وكانت النواتج هي المنتج المستهدف فضلاً عن النفايات الصلبة ومياه الصرف.

(١) كل وحدات الطن المذكورة في هذا الفصل هي طن متري (حوالي ١,١٠٢ طن قصير).



الشكل رقم (١ ,١٣). مخطط سير عملية مبسط كما يستخدم في النهج العام.

(١ ,٢ ,١٣) الافتراضات التقنية لطرق التقنية الحيوية الصناعية

Technology Assumptions for Industrial Biotechnology Routes

عند إعداد ميزان الكتلة، يتم تقدير تدفقات الكتلة لجميع المكونات استناداً إلى المعايير الأساسية التالية: العائدات، والإنتاجية، وتركيز المحلول لخطوة التخمير (الجدول رقم ١ ,١٣). يحدد تركيز المحلول[٢] كمية المياه في بيئة التخمير وعليه يؤثر في الطاقة المطلوبة في التجهيز النهائي. وهو يحدد مع الإنتاجية[٣] زمن البقاء فضلاً عن حجم معدات التخمير. ولا يؤثر العائد[٤] على المدخلات المطلوبة من سكر التخمير فحسب ولكن أيضاً على كمية نفايات الكتلة الحيوية المنتجة. يتم فصل نفايات الكتلة الحيوية من مجرى المنتج عن طريق خطوة ترشيح فائق والتي تتبع التخمير مباشرة. يتم تجفيف نفايات الكتلة الحيوية ثم حرقها لإنتاج البخار. ويتم تدوير مياه العملية كلما أمكن ذلك من أجل تفادي الاستهلاك المفرط.

(٢) يعرف تركيز محلول بيئة التخمير بأنه كتلة المنتج بالنسبة إلى الحجم الكلي لمحلول التخمير (جم/ لتر).

(٣) تعرف الإنتاجية بأنها كتلة المنتج مقسومة على حجم بيئة التخمير لكل وحدة من الوقت اللازم لإنتاج هذه الكمية (جم/ [لتر*ساعة]).

(٤) يعرف العائد بأنه كتلة المنتج مقسومة على كتلة سكر التخمير (جم/ جم).

obeikandl.com

الجدول رقم (١ ,١٣). أنواع التخمير والبيانات الرئيسة على التركيز، والإنتاجية، وعائد التخمير للتقنية الحالية والمستقبلية.

المنتج	أنواع التخمير			التركيز (جم/ لتر)	الإنتاجية (جم/ لتر*ساعة)	العائد جم منتج/ جم جلوكوز	المرجع
	حالياً/ مستقبلاً	هوائية/ لاهوائية	دفعة واحدة/ مستمرة				
حمض الخليك	حالياً	لاهوائية	دفعة واحدة	١٨	٠,١٥	٠,٥٠	[١٢، ٢٠]
	مستقبلاً	لاهوائية	مستمرة	٥٠	١٥	٠,٩٠	
حمض الأديبيك	حالياً	هوائية	دفعة واحدة	٢٠	٠,٤٢	٠,١٧	[٢٣]
	مستقبلاً	هوائية	مستمرة	٤٠	١٠	٠,٤٧	
البيوتانول	حالياً	لاهوائية	مستمرة	٢٠	٠,٣٦	٠,٤٢	[٥، ٨، ٣٠]
	مستقبلاً	لاهوائية	مستمرة	٤٥	١٥	٠,٥٠	
الإيثانول	حالياً	لاهوائية	مستمرة	١٠٠	٢,٢٠	٠,٤٦	[٣، ١٠، ٢١]
	مستقبلاً	لاهوائية	مستمرة	١٣٠	٥٠	٠,٤٧	
حمض اللاكتيك	مستقبلاً	لاهوائية	مستمرة	١٨٠	٢٠	٠,٩٥	
PDO	حالياً	هوائية	كلاً منهما	١٠٠	١,٦٧	٠,٤١	[٣٦]
	مستقبلاً	هوائية	مستمرة	١٠٠	١٥	٠,٥٤	
PHA	حالياً	هوائية	دفعة واحدة	١٥٠	٣,٠٠	٠,٣٥	[٢]
	مستقبلاً	هوائية	مستمرة	١٥٠	١٠	٠,٤٣	
حمض السكسينيك	حالياً	لاهوائية	دفعة واحدة	٨٠	١,٨	٠,٨٨	[١٩، ٣٨]
	مستقبلاً	لاهوائية	مستمرة	١٥٠	١٥	١,٠١	

تم وضع افتراضات للعوامل الرئيسة للتقنية الحالية والمستقبلية بوصفها جزءًا من النهج العام فيما يتعلق بعمليات التخمير والتجهيز النهائي (الجدول رقم ١ ,١٣).

١- للتقنية الحالية، تم افتراض كلٍ من عمليات الدفعة الواحدة والعمليات المستمرة واستندت الحسابات على البيانات من الوحدات الصناعية، والمحطات التجريبية، أو تجارب المختبر. اعتمدت قيم العائدات، وتركيز المحلول، والإنتاجية في الجدول رقم (١ ,١٣) لتقنية التخمير الحالية على البيانات المنشورة. ويتم تقسيم أي سكر تخمير لا يتم تحويله إلى المنتج المستهدف بين المنتجات الثانوية، ونفايات الكتلة الحيوية، وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون وفقاً للبيانات المنشورة [٢، ٣، ٥، ٨، ١٠، ١٢، ١٩-٢١، ٢٣، ٣٠، ٣٦، ٣٨، ٣٩]. وفيما يتعلق بحمض اللاكتيك، أجريت الحسابات العامة فقط للتقنية المستقبلية؛ لأن البيانات الصناعية لإنتاج حمض اللاكتيك وفقاً للتقنية الحالية كانت متاحة [٤٣].

٢- للتقنيات المستقبلية، تم افتراض العمليات المستمرة فقط وتفترض الحسابات عقدين إلى ثلاثة عقود من البحث والتطوير الناجح (R&D، انظر الجدول رقم ١ ,١٣)، وهو ما يمثل مستوى أعلى ممكن من جدوى التقنية. ولعمليات التخمير المستقبلية، فإننا نفترض عائداً من ٩٠ مول٪ من العائد النظري الأقصى. ويتم تحويل سكر التخمير المتبقي (١٠ مول٪) إلى نفايات الكتلة الحيوية وثاني أكسيد الكربون فقط، مع نسبة كربون مفترضة ٢:١ للعمليات الهوائية و١:١ للعمليات اللاهوائية[٥]. ويعني هذا أن مسارات المنتجات الثانوية يمكن تثبيطها، والتي من المرجح أن تتطلب التعديل الوراثي للكائن الدقيق. استندت تقديرات الإنتاجيات المستقبلية على الخبرة من المصانع كبيرة المستوى المنتجة لحمض الستريك والإيثانول كمثالين لعمليات التخمير الهوائية واللاهوائية المتقدمة. وقدرت مستويات الإنتاجية الأعلى المستقبلية هذه بواسطة الخبراء لتصل إلى ١٠ جم/لتر*ساعة لحمض الستريك[٦] و٥٠ جم/لتر*ساعة للإيثانول[٧]. وكان من المفترض أن تقترب إنتاجية المواد الكيميائية الأخرى من قيم الأفق لحمض الستريك لعملية التخمير الهوائية والإيثانول لعملية التخمير اللاهوائية، وهو ما يمثل مستوى مماثل من الطموح. وتم تقدير تركيزات محلول التخمير المستقبلية للعمليات المستمرة لتكون في حدود قيم نهاية عمليات الدفعة الواحدة الحالية؛ بسبب التفاعلات بين الإنتاجية والتركيز:

- سوف تعتمد التقنية المستقبلية على التخمير المستمر عند نقطة أقصى إنتاجية للكائنات الحية الدقيقة مع إزالة المنتج في الموقع. وتحدث الإنتاجية القصوى للعمليات الحالية عند ما يقرب من نصف التركيز الأقصى للدفعة الواحدة.
- للتقنية المستقبلية، فإن تركيز محلول التخمير الموافق لهذه الإنتاجية القصوى يفترض أن يتم زيادته بعامل ٢، مما يؤدي إلى تركيزات لمحلول التخمير في مستوى تخمير الدفعة الواحدة الحالي. وقد تم استعراض القيم المقترضة لهذه العوامل التقنية بصورةٍ دقيقة بواسطة خبراء من الصناعة والأوساط الأكاديمية [٢٧] وتمثل القدرة التقنية بعد ٢٠-٣٠ سنة من البحث والتطوير. ومع ذلك، ينطوي توقع العوامل التقنية الرئيسة المستقبلية دائماً على عدم اليقين.

---

(٥) يستند هذا التقدير على الحسابات المفصلة لتقسيم الكربون لأربعة عمليات تخمير لاهوائية وأربعة عمليات تخمير هوائية. العمليات الهوائية لديها نسب حوالي ٢:١. يكون الانتشار للعمليات اللاهوائية أكبر بكثير؛ وحيث يجب تكوين ثاني أكسيد الكربون الأيضي أقل من العمليات الهوائية فقد افترضنا نسبة ١:١.

(٦) تم ذكر إنتاجيات تصل إلى ٥ جم/لتر*ساعة [٣٢]، لذلك تبدو الزيادة بعامل ٢ التي ينتج عنها ١٠ جم/لتر*ساعة ممكنة خلال ٢٠-٣٠ سنة.

(٧) ذكر بعض الكتاب [١٧، ٣١] إنتاجيات حتى أعلى من ٥٠ جم/لتر*ساعة، ولكن مع الإنتاجيات الحالية حوالي ٢ جم/لتر*ساعة، فإن الزيادة بعد ٥٠ جم/لتر*ساعة على نطاقٍ صناعي تبدو غير محتملة في غضون ٢٠-٣٠ سنة.

يقدم الجدول رقم (٢, ١٣) لمحة عامة عن أنواع عمليات التجهيز النهائي التي كانت تستخدم لفصل منتجات التخمير[٨]. كانت أنواع عمليات التجهيز النهائي للتقنيات الحالية مستمدة من المراجع.

الجدول رقم (٢, ١٣). أنواع عمليات التجهيز النهائي المستخدمة للفصل في التقنيات الحالية والمستقبلية لمنتجات التقنية الحيوية الصناعية.

	التقنية الحالية	التقنية المستقبلية
البلورة	السكسينيك [٣٨]، الأدبيبك [٤٦]	السكسينيك، الأدبيبك
التقطير	PDO [٣٦]، الإيثانول [١٠]، ABE [٣٠]	الإيثانول، ABE
الفصل الغشائي الكهربائي	السكسينيك [٤٨]، الخليك [٩]	الأوسينيك، اللاكتيك، الخليك، الأدبيبك
الإنزيمات	PHA [٤٠]	PHA
الاستخلاص	الخليك [٤٧]، PHA [٤٠]	الخليك[١]
التجريد الغازي	ABE [٥]	ABE
التبخير المسبق	الإيثانول [١٨]	PDO، الإيثانول، ABE

[١] لتقنية حمض الخليك المستقبلية، لا يوجد فقط مخططات العملية على الاستخلاص والفصل الغشائي الكهربائي ولكن أيضاً واحدة تجمع بين كلٍ من تقنيات الفصل هذه.

واستندت الافتراضات عن عمليات الفصل التقنية المستقبلية على عدد من الاعتبارات:

- لا يعدُّ الترسيب صالحاً للإنتاج على نطاقٍ واسع؛ لأنه ينطوي على استخدام كميات كبيرة من المواد الكيميائية ويؤدي إلى منتجات ثانوية أقل قيمة مثل الجبس و/ أو مياه الصرف مع أحمال عالية من الملح.
- تم اعتبار الاستخلاص والامتصاص خيارات مستقبلية مقبولة؛ بسبب الاستخدام المحتمل "للمذيبات الخضراء" ذات الآثار البيئية الأقل الواضحة (على سبيل المثال، من حيث التأثيرات المسرطنة والسامة) مقارنةً مع المذيبات الحالية.
- تم أخذ عمليات الغشاء مثل التبخير المسبق، والفصل الغشائي الكهربائي، والترشيح الفائق في الاعتبار؛ بسبب استخدامها المنخفض للطاقة (المتوقع). ومع ذلك، فإن كمية كبيرة من البحث والتطوير سوف تبقى في كثيرٍ من الأحيان ضرورية لوضع عمليات الأغشية هذه قيد الاستخدام على النطاق الصناعي.
- تفترض التقنيات الحالية وكذلك المستقبلية خطوة تبخير واحدة تصل بنسبة الماء إلى المنتج إلى ١:٥ لعمليات التبخير؛ وللنسب الأعلى من الماء، تم افتراض التبخير ثنائي التأثير وتم اعتبار زيادة تكاليف الاستثمار.

(٨) حمض البولي لاكتيك، البولي ثلاثي الميثيلين رباعي الفيثالات، الإيثيلين، والإيثيل لاكتات لا تظهر في الجدول رقم (٢, ١٣) لأنها تنتج من التحويل الكيميائي من أحد منتجات التقنية الحيوية الصناعية المدرجة في هذا الجدول.

openkanal.com

(٤, ١, ٢, ١٣) استخدام الطاقة Energy Use

تم تحديد طاقة العملية للنظام المشمول في النهج العام عن طريق ضرب إنتاجية الكتلة والحجم في استخدام الطاقة النوعية المتوقع لكل خطوة في العملية. وتم تقدير الطاقة النوعية للعملية كما هو موضح في الجدول رقم (٣, ١٣). على أساس المراجع، ثم معايرتها (للوصف المفصل للطريقة نظر [٢٧]).

الجدول رقم (٣, ١٣). البيانات الرئيسة على استخدام الطاقة الخاص لعمليات الوحدات في التخمير والتجهيز النهائي [٢٧].

عمليات الوحدة	الكمية	الوحدة
التخمير		
التعقيم	٠,١٠٠	كجم بخار/ كجم بيئة التخمير
التقليب	٠,٥٠٠	كيلو وات قوة/ م^{٣} حجم التخمير
التقليب والتهوية	٣,٠٠٠	كيلو وات قوة/ م^{٣} حجم التخمير
التجهيز النهائي		
الترشيح الغشائي		
الترشيح الدقيق	٢,٠٠٠	كيلو وات ساعة قوة/ م^{٣} محلول الرشيح
الترشيح الفائق	٥,٠٠٠	كيلو وات ساعة قوة/ م^{٣} محلول الرشيح
الترشيح بأغشية الفصل	٥,٠٠٠	كيلو وات ساعة قوة/ م^{٣} محلول الرشيح
الترشيح النانوي	٧,٠٠٠	كيلو وات ساعة قوة/ م^{٣} محلول الرشيح
الأسموزية العكسية	٩,٠٠٠	كيلو وات ساعة قوة/ م^{٣} محلول الرشيح
الفصل الغشائي الكهربائي	٠,١٠٠	كيلو وات ساعة قوة/ مكافئ
تبخير الماء،	١,٢٠٠	كجم بخار/ كجم متبخر
مرحلة واحدة	٠,٤٠٠	كيلو وات ساعة قوة / كجم متبخر
تبخير الماء،	٠,٥٠٠	كجم بخار/ كجم متبخر
عدة مراحل	٠,٠٠٥	كيلو وات ساعة قوة / كجم متبخر
التقطير	١,٣*حرارة تبخير المنتج	كجم بخار/ كجم متبخر

(٢, ٢, ١٣) منهجية التأثيرات البيئية Environmental Impacts Methodology

نحن نقوم بتحليل الأداء البيئي لإنتاج المواد الكيميائية الضخمة من الكتلة الحيوية باستخدام التقنية الحيوية الصناعية آخذين في الاعتبار التقنية الحالية والمستقبلية (٢٠٣٠) ثم مقارنة النتائج مع تلك لإنتاج البتروكيماويات الضخمة. ونركز بشكلٍ خاص على استخدام المنتجات المختارة كمواد كيميائية ونستبعد استخدامها كوقود وعلف للحيوانات.

obeikandl.com

(١ , ٢ , ٢ , ١٣) حدود النظام System Boundaries

نحن نستنتج من التقييمات البيئية التي أجريت لأنظمة من المهد-إلى- بوابة المصنع ومن المهد-إلى-اللحد في باتل وآخرون [٢٧]. لتقييم الآثار البيئية لهذه المواد الكيميائية، يكون ضرورياً إجراء التقييم عبر دورة الحياة الكاملة للمنتجات (من المهد إلى اللحد) ونحن نقدم بذلك فقط النتائج لهذه الأخيرة. وتم تمييز خمسة نظم فرعية عند نمذجة دورة الحياة (الشكل رقم ٢ , ١٣):

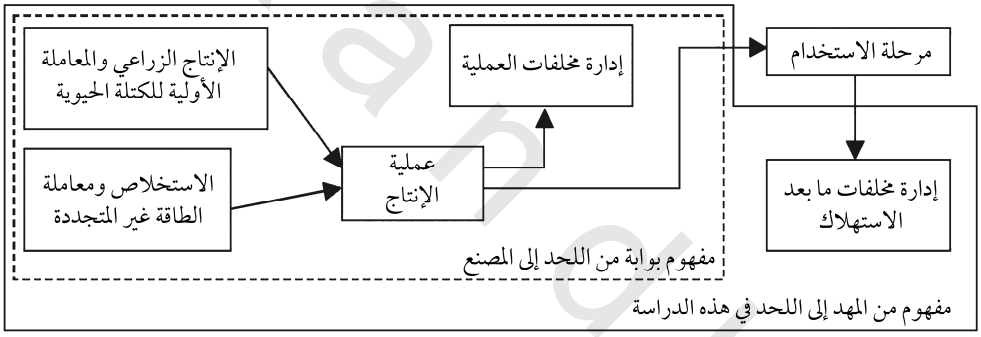
١- استخلاص موارد الطاقة غير المتجددة مثل النفط الخام.

٢- الإنتاج الزراعي والمعالجة المسبقة للكتلة الحيوية.

٣- العملية الحيوية (عملية الإنتاج الفعلي).

٤- إدارة نفايات العملية.

٥- إدارة النفايات بعد المستهلك.



الشكل رقم (٢ , ١٣). الأنظمة الفرعية وحدود النظام التي تعدُّ ضمن التقييم البيئي للكيماويات الحيوية والبتروكيميائية.

تم استبعاد مرحلة الاستخدام؛ لأنها عادةً مطابقة للمنتجات القائمة على العمليات الحيوية والمنتجات القائمة على البتروكيماويات المقارنة (على سبيل المثال، أحد مكونات البلاستيك في سيارات الركاب)؛ وكحجة إضافية، فإن المواد الكيميائية الضخمة عادةً لا تؤدي إلى انبعاثات خلال هذه المرحلة.

(٢ , ٢ , ٢ , ١٣) تخصيص وتوسيع النظام Allocation and System Expansion

يجب اختيار طريقة تسمح بالتعبير عن الأثر البيئي بالنسبة للوحدة الوظيفية المختارة وذلك لكافة العمليات متعددة الوظائف التي تؤدي إلى أكثر من منتجٍ واحد. وطريقتا التخصيص الأكثر استخداماً لهذه الغاية هما توسيع وتقسيم النظام. يعبر توسيع النظام النموذجي عن منتج ثانوي عن طريق توسيع النظام الذي تم تحليله ليشمل

أيضاً إنتاج المنتج الثانوي عن طريق وسائل بديلة. ويغير هذا النهج الوحدة الوظيفية إلى طنٍ واحد من المادة الكيميائية المطلوبة، بالإضافة إلى كمية X من المنتج الثانوي. ومن أجل إجراء توسيع النظام والحد من الوحدة الوظيفية إلى طنٍ واحد من المادة الكيميائية المطلوبة فإننا ندخل أرصدة تمثل التأثيرات المتجنبة المتصلة بتصنيع المنتجات الثانوية (انظر [٤٤]). ويستخدم توسيع النظام عندما يمكن أيضاً إنتاج المنتج الثانوي (على سبيل المثال، الكهرباء من تفل قصب السكر) خلال عملية قائمة بذاتها (على سبيل المثال، الكهرباء من الفحم). من الناحية الأخرى، فإنه لابد من استخدام التقسيم عندما لا توجد مثل عملية الإنتاج هذه، مثل حطب الذرة (الذي يمكن فقط إنتاجه مع الذرة).

ويتم التقسيم في الغالب من خلال تقسيم الأثر البيئي الكلي وفقاً لنسبة الكتلة أو القيمة الاقتصادية للمنتجات. وفي هذه الدراسة كان تخصيص وتوسيع النظام متصلين بإنتاج سكر التخمير، والإنتاج المشترك للمواد والطاقة، والإنتاج المشترك للكثير من المواد الكيميائية في خطوة التخمير. على سبيل المثال، فإن الطاقة الناتجة من حرق نفايات الكتلة الحيوية التي تنشأ من العمليات الحيوية ينتج عنها رصيد طاقة والذي تم خصمه من مدخلات الطاقة غير المتجددة؛ لأن هذه الطاقة تزيح استخدام الطاقة غير المتجددة، على سبيل المثال، الكهرباء من الشبكة. كما تم استخدام توسيع النظام أيضاً للتعامل مع منتجات التخمير الثانوية: تم إضافة جميع المدخلات للتخمير وإدخال أرصدة للمنتجات الثانوية (على سبيل المثال، الأسيتون والإيثانول في حالة ABE). وكانت هذه الأرصدة مساوية لإنتاج هذه المنتجات الثانوية من البتروكيماويات؛ لأن المنتجات الثانوية من التقنية الحيوية الصناعية كان يفترض أن تزيح البتروكيماويات المتطابقة كيميائياً. كما استخدم التقسيم أيضاً في إنتاج سكريات التخمير (انظر القسم ٣,٢,٢,١٣).

(٣,٢,٢,١٣) إنتاج سكر التخمير Production of Fermentable Sugar

تم أخذ ثلاثة أنواع من سكر التخمير للتحليل البيئي في الاعتبار: الجلوكوز من نشا الذرة، والسكروز من قصب السكر، وسكريات التخمير من اللجنوسليولوزات. ويتم إنتاج الجلوكوز ($C_6H_{12}O_6$) من الذرة باستخدام الإنزيمات لتحليل نشا الذرة. وقد أخذت مجموعة البيانات من المراجع [٤١، ٤٢]. وفي حالة الإنتاج الزراعي، تم تقسيم الآثار البيئية بين الذرة وحطب الذرة المزال من الحقل من خلال تخصيص اقتصادي باستخدام نسبة سعر من ١:٤ للذرة مقارنةً بالحطب. وتم افتراض أن سكريات التخمير من نشا الذرة تنشأ من طاحونة رطبة حديثة للذرة بواسطة التحليل المائي للنشا إلى سكر العنب. وقد اعتمدنا على تخصيص منتج ثانوي مفصل قائم على الكتلة (انظر أيضاً [٤٢]) والذي أخذ في الاعتبار العمليات الفرعية التي كانت مطلوبة للمنتجات الثانوية لسكر التخمير من الذرة. وبعد حساب المنتجات الثانوية يكون الإدخال الصافي هو ١,٠٦ كجم من الذرة الجافة لـ ١ كجم من الجلوكوز.

ينتج عن طحن قصب السكر السكروز ($C_{12}H_{22}O_{11}$) وتفل قصب السكر. وتم حساب مجموعة البيانات من المراجع [٦، ٢٢]. يتم حرق التفل لتوليد الطاقة؛ لأنه منتج منخفض القيمة ذو استخدام محدود. ولذلك، فقد استخدمنا مدخل المصنع الإجمالي من قصب السكر كنقطة البداية في التخصيص الافتراضي والأرصدة المعتمدة للطاقة المنتجة من تفل قصب السكر. وبهذا هناك حاجة لـ ٨,٧ كجم من قصب السكر الرطب لإنتاج ١ كجم من السكروز.

سكريات التخمير من الكتلة الحيوية الخشبية، التي يشار إليها أيضاً بسكريات C5/C6، هي عادةً مزيج من الجلوكوز، والزيلوز، وكميات أقل من السكريات الأخرى التي يتم الحصول عليها خلال تحليل السليولوز والهيميسيليولوز. وقد افترضنا إنتاج سكريات C5/C6 من حطب الذرة واستخلصنا مجموعة البيانات من المرجع [١]. ولذلك كان الغرض الرئيس من زراعة الذرة وسوف يبقي هو إنتاج النشا من حبوب الذرة. الحالة الافتراضية لتخصيص المدخلات للإنتاج الزراعي لحطب الذرة هي تخصيص اقتصادي باستخدام نسبة سعر ١:٤ للذرة مقارنةً بالحطب. ويتطلب إنتاج طن واحد من سكر التخمير ١,٧٩ طن من حطب الذرة.

(١٣,٢,٢,٤) جرد دورة الحياة Life Cycle Inventory

يتميز كل مدخل ومخرج من العمليات المنمذجة بقيمته لتوليد الحرارة (HHV في جيجا جول/ طن)، واستخدام الطاقة التراكمي لإنتاجه، والكربون المجسم له، وانبعاثات المدخلات لغازات الاحتباس الحراري التراكمية (GHG)، واستخدام الأراضي اللازمة للإنتاج الزراعي. وتمثل بيانات البتروكيماويات المستخدمة كمواد مساعدة التقنية الحالية وتنبع من الصناعة [٣٧] ومن حساباتنا الخاصة اعتماداً على المرجع [٢٨]. واستخدمت مجموعات البيانات هذه بعد ذلك لحساب انبعاثات غازات الاحتباس الحراري التراكمية، والطاقة غير المتجددة، واستخدام الأراضي عن طريق إضافة البيانات ذات الصلة لجميع مدخلات العملية.

(١٣,٢,٢,٥) المؤشرات البيئية Environmental Indicators

يتضمن التقييم الكامل لدورة الحياة (LCA) حساب مجموعة من الآثار البيئية، من بينها التحمض، وزيادة المواد الغذائية، وانبعاثات الجسيمات، والسمية الإنسان، وسمية البيئة. ومع ذلك، فإن الدراسة المقدمة هنا هي تقييم بيئي محتمل يتعامل مع طرق المعالجة المستقبلية وتستخدم لذلك تفويضات للأثر البيئي العام: قد يصبح استخدام الطاقة غير المتجددة (NREU)، وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري، واستخدام الأراضي (LU)؛ والطاقة والأرض مصادر شحيحة. وحسبنا استخدام الطاقة غير المتجددة، وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري، واستخدام الأراضي لجميع منتجات التقنية الحيوية الصناعية. وتعد هذه المؤشرات هي تفويضات جيدة للأثر البيئي العام.

يمثل استخدام الطاقة غير المتجددة نهجاً واضحاً وعملياً؛ لأن الكثير من الآثار البيئية مرتبطة باستخدام الطاقة [١٣]. يشمل استخدام الطاقة غير المتجددة الطاقة الحفرية والنووية وتم التعبير عنها بقيمة التسخين الأعلى (HHV)، وتدعى أيضاً قيمة توليد الحرارة الإجمالية. وتمشياً من منهجية LCA، فإن قيم NREU المذكورة هنا تمثل الطلب على الطاقة التراكمية لنظام من المهد إلى اللحد.

وتعد انبعاثات غازات الاحتباس الحراري ذات أهمية متزايدة؛ بسبب زيادة الاهتمام في تأثير ظاهرة الاحتباس الحراري في ساحة السياسة، بواسطة الشركات، وبواسطة الجمهور. تم حساب انبعاثات غازات الاحتباس الحراري بمكافئات ثاني أكسيد الكربون وتتكون من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري من النظام في شكل ثاني أكسيد الكربون أو غاز الميثان وكذلك أكسيد النيتروز (N_2O) من استخدام الأسمدة في إنتاج الكتلة الحيوية. وتم استبعاد انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من الكربون المتجدد المستخرج من الغلاف الجوي خلال نمو النباتات.

يشير استخدام الأراضي إلى استخدام الأراضي الزراعية فقط، وسوف يكون ذو أهمية متزايدة في المستقبل؛ بسبب نمو الاحتياجات من الأراضي للطاقة القائمة على المصادر الحيوية، والوقود الحيوي السائل، والمواد الكيميائية القائمة على المصادر الحيوية، وإنتاج الغذاء والأعلاف. وقد أهملنا احتياجات الأراضي للمنشآت الصناعية، والبنية التحتية للمواصلات، ولإدارة النفايات؛ لأنها صغيرة بالمقارنة مع استخدام الأراضي الزراعية وقابلة للمقارنة مع المنتجات القائمة على المصادر الحيوية والبتروكيماويات.

(١٣, ٢, ٣) اقتصاديات العملية Process Economics

تم إجراء التحليل الاقتصادي للمواد الكيميائية في التقنية الحيوية الصناعية بقدرة منشأة ١٠٠ كيلو طن/ سنة، والذي كان حلاً وسطاً في ضوء مقياس الاقتصاد من ناحية، وتكاليف النقل للمصادر الأولية الحيوية من الناحية الأخرى. وقد اعتبر هذا المقياس ممثلاً لمنشأة تقنية حيوية صناعية، ولكن تصبح نطاقات أوسع ممكنة أيضاً وتم إجراء تحليل الحساسية لتقييم تأثير حجم المصنع على الجدوى الاقتصادية. وتم حساب عمليات البتروكيماويات حسب أحجام المصانع الحالية، والتي يمكن أن تكون أكبر من ١٠٠ كيلوطن بشكلٍ واضح، اعتماداً على المنتج.

واستندت جميع حسابات التكلفة على الاستثمارات لبناء مصنع جديد في أوروبا الغربية، مع الحسابات التي أجريت باليورو في عام ٢٠٠٠م. تم تقدير الاستثمار (رأس المال الثابت الكلي، TFC) ومتطلبات العمل من قبل شركة DSM عن طريق تطبيق ما يسمونه أسلوب الوحدة الوظيفية [٣٥]. تم إجراء هذه الحسابات لكل مسار عام للتقنية الحيوية الصناعية القائمة على مخطط سير عملية المنتج الفردي، وميزان الكتلة والطاقة (انظر [٢٧] للأرقام

الفردية). وقد استخدمنا أسعار السوق لمخزونات البتروكيماويات والمواد المساعدة، وتم تعيين أسعار سكر التخمير خارجياً (انظر القسم ١, ٢, ٣, ١). وتتماشي إجراءات التقييم الاقتصادي (انظر الشكل رقم ١٣, ٣) مع اقتصاديات الأعمال القياسية: أولاً، تم إضافة التكاليف المتغيرة (المواد الأولية، والمواد المساعدة/ المحفزات، والمنتجات الثانوية، والمرافق، ومعالجة النفايات) والتكاليف الثابتة (المستلزمات والعمالة) للحصول على إجمالي تكاليف التشغيل المباشرة. ثانياً، تم إضافة الضرائب ورسوم التأمين، والنفقات العامة لهذا الرقم فضلاً عن بدل للتسويق والإدارة والبحث والتطوير. وأخيراً، تم إضافة ما يسمى رسوم رأس المال، وهو ما يمثل مجموع الاستهلاك والأرباح. وكانت النتيجة النهائية هي تكلفة الإنتاج مضافاً إليها الأرباح (PCPP؛ المعروفة أيضاً بتكلفة الإنتاج) التي هي تفويض لسعر السوق. تم حساب رسوم رأس المال عن طريق ضرب رأس المال الثابت الكلي مع نسبة مئوية ثابتة. بالتشاور مع خبراء الصناعة، تم استخدام رسوم رأس مال بحوالي ٣٠٪، وهو ما يمثل احتمال جزئياً. ولم تدرج ضريبة القيمة المضافة في الحسابات.

الشكل رقم (١٣, ٣). طريقة حساب تكاليف الإنتاج مضافاً إليها الأرباح (PCPP).

ويعدُّ منتج التقنية الحيوية الصناعية مجدياً من الناحية الاقتصادية إذا كان الـ PCPP له أقل من سعر السوق أو الـ PCPP لنظيره من البتروكيماويات. وقد يكون سعر السوق الحقيقي لمنتج التقنية الحيوية الصناعية أعلى أو أقل من الـ PCPP له اعتماداً على العرض والطلب:

● عادةً ما تكون الـ PCPP لمنتج التقنية الحيوية الصناعية أقل بكثير من سعر السوق إذا كان منتج التقنية الحيوية الصناعية جديداً على السوق وإذا تم استخدامه في تطبيقاتٍ متخصصة. والأسباب المحتملة هي أن الربح المصنوع يكون أعلى، والقدرة الحقيقية لمرافق الإنتاج أقل من ١٠٠ كيلو طن/ سنة بشكلٍ واضح، لم يتم تحسين العملية و/ أو لا يمكن ضمان التشغيل المستمر.

● يمكن أيضاً أن تكون الـ PCPP لمنتج التقنية الحيوية الصناعية أعلى من سعر السوق. هذه هي الحالة خاصةً إذا كان منتج التقنية الحيوية الصناعية متطابقاً من الناحية الكيميائية مع منتج بتروكيميائي والذي يتم إنتاجه منذ عقود خلال طريق إنتاج مؤكد. ويمكن لمثل عمليات البتروكيماويات هذه أن تكون متفوقة اقتصادياً؛ بسبب المزايا الاقتصادية للنطاق و/ أو الإنتاج في المصانع منخفضة القيمة.

(١, ٣, ٢, ١٣) أسعار سكريات التخمير Prices of Fermentable Sugars

كان سكر التخمير هو المادة الخام لعمليات التقنية الحيوية الصناعية ويتأثر سعره باقتصاديات منتجات التقنية الحيوية الصناعية. يمكن أن يكون سكر التخمير خام أو منقى ويتكون من الكربوهيدرات سهلة التخمر المستمدة من الكتلة الحيوية مثل السكروز، أو أنواع النشا المحللة أو اللجنوسليولوز الذي تمت معاملته وتحليله سابقاً، والتي لا تزال تقنية ناشئة. ومن أجل تمثيل الاختلافات في أسعار السكر في كلٍ من المستقبل القريب والبعيد بالنسبة لمناطق العالم، فقد أجريت الحسابات لمستويات أربعة أسعار لسكر التخمير. أقل الأسعار ٧٠ يورو/ طن يمثل أسعار السكر المحلية في البرازيل[٩]: بسبب الظروف المناخية الجيدة وتوافر العمالة الرخيصة جداً، فإن تكلفة إنتاج سكر التخمير من قصب السكر كانت في حدودها الدنيا. وارتفاع سعر السكر إلى ٢٠٠ يور/ طن يمثل متوسط ١٠ أعوام للسكر الخام العالمي (عقد ١١) كما تم تداوله في مجلس نيويورك للتجارة [٢٤]. وتم اختيار سعر متوسط عند ١٣٤ يورو/ طن. ويمثل المستوى الأقصى عند ٤٠٠ يورو/ طن متوسط ١٠ أعوام للسكر الخام في الولايات المتحدة (عقد ١٤) كما تم تداوله في مجلس نيويورك للتجارة [٢٥][١٠].

---

(٩) على أساس متوسط سعر السكر ٢٥٠ ريال برازيلي لموسم ٢٠٠٣/ ٢٠٠٤م [٢٦] وسعر صرف ريال برازيلي = ٠,٢٩ يورو في نفس الوقت.

(١٠) تستند مستويات الأسعار هذه على أسعار السكر الخام. ومع ذلك، إذا كانت الكائنات الحية الدقيقة حساسة للشوائب فإنه سوف يتم استخدام السكر المنقى للتخمير. ويتم تداول السكر المنقى العالمي في بورصة لندن بمتوسط سعر حوالي ٢٥٠ يورو/ طن خلال العشر سنوات الماضية [٣٣] وبالتالي ضمن نطاق الأسعار التي أخذت في الاعتبار.

وتم إدخال مستويات الأسعار لطن سكر التخمير كمدخلات خارجية في حساباتنا، أي، نحن لا نقوم بالتحليلات الاقتصادية للمجموعات المختلفة من أنواع المصادر الأولية مع التقنيات لإنتاج سكر التخمير.

(١٣,٢,٣,٢) أسعار المرافق والمواد المساعدة Prices of Utilities and Auxiliaries

في التقييم الاقتصادي نفترض سعر النفط الخام لسوق أسهم افتراضي بـ٧٠ دولاراً أمريكياً للبرميل الواحد (١٢ يورو/ جيجا جول) وسعر الغاز الطبيعي بـ ٨,٥ يورو/ جيجا جول. ويتوافق هذا مع سعر كهرباء تقديري بـ ١٧ يورو/ جيجا جول[كهرباء] وسعر بخار بـ ٢٥ يورو/ طن (١١,٩ يورو/ جيجا جول). ويتم إدخال أرصدة اقتصادية من أجل حساب الإنتاج المتجنب للحرارة والطاقة إذا تم استرجاع الطاقة. وتم افتراض أن أسعار الإنزيم والغشاء سوف تنخفض في المستقبل؛ بسبب حجم إنتاجها الكبير. وتم تحديد أسعار الإنزيمات للتقنية الحالية بـ ١٠٠ يورو/ كجم، وتم افتراض أنها سوف تنخفض بمعامل ١٠ للتقنية المستقبلية؛ وتحديد أسعار الأغشية عالية الجودة بـ ١٠٠ يورو/ طن من المنتج مع افتراض انخفاضها بواقع معامل ٢.

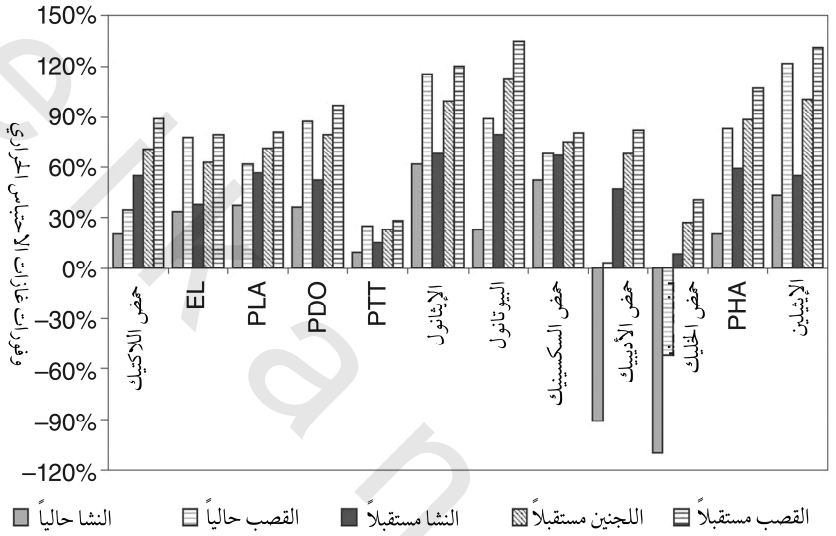
(١٣,٣) النتائج العامة Overall Results

(١٣,٣,١) نتائج التحليل البيئي Results of Environmental Analysis

تعتمد الآثار البيئية للعمليات التي تمت داستها إلى حدٍ كبير على الإنتاجيات، والعائدات، والتركيزات التي تم افتراضها لمرحلة التخمير [٢٧]. من أجل تقييم إمكانية التقنية الحيوية الصناعية طويلة المدى، فإننا نختار قيم مستقبلية من المتوقع أن يتم التوصل إليها بعد ٢٠-٣٠ سنة من البحث والتطوير الناجحين (قيم الأفق). ونقدم في هذا البحث فقط نتائج انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، ولكن تظهر نتائج الـ NREU النمط نفسه (انظر [٢٧]). يظهر الشكل رقم (١٣,٤) تحليل المنتجات تباعاً لمتوسط وفورات غازات الاحتباس الحراري في منتجات التقنية الحيوية الصناعية مقارنةً مع مكافئاتها البتروكيماوية. يمثل كل شريط في الشكل رقم (١٣,٤) المتوسط الحسابي خلال عدة طرق إنتاج في التقنية الحيوية الصناعية لنفس المادة الكيميائية. يظهر الشكل رقم (١٣,٤) أن المنتجات ذات أعلى وفورات نسبية هي الإيثانول، والبيوتانول، والإثيلين، بينما حمض الخليك والـ PTT كان لها أقل وفورات. وكانت الاختلافات بين أفضل الحالات والمتوسطات الحسابية ٧-٢٠٪ في وفورات غازات الاحتباس الحراري. يبين الشكل رقم (١٣,٤) أن جميع المنتجات تقريباً واعدة لوفورات غازات الاحتباس الحراري في التقنية الحالية.

بالنسبة للـ PHA وحمض الأدييك يعتمد هذا على مصدر سكر التخمير. ولا يقدم حمض الخليك أي وفورات باستخدام التقنية الحالية؛ بسبب انخفاض تركيز محلول البيئة وانخفاض الإنتاجية في التخمير، فضلاً عن

ارتفاع استخدام المرافق في التجهيز النهائي؛ بسبب صعوبة فصل حمض الخليك من المياه (خليط ازوتروبي). وتكون وفورات غازات الاحتباس الحراري منخفضة في حالة الـ PTT لأن هذا البوليمر مصنوع من الـ PDO وحمض التيرفثاليك المنقى، وينتج هذا الأخير من مواد البتروكيماويات الأولية. تكون وفورات غازات الاحتباس الحراري لقصب السكر كمصدر لسكر التخمير هي أعلى بشكلٍ واضح من نشا الذرة؛ بسبب الإنتاج الثانوي لكميات هائلة من الكهرباء التي يمكن تصديرها (انظر القسم ٣,٢,٢,١٣).



الشكل رقم (٤,١٣). وفورات انبعاثات غازات الاحتباس الحراري (GHG) لكل طن من كيماويات التقنية الحيوية الصناعية مقارنةً مع نظرائها البتروكيماوية للتقنية الحالية والمستقبلية، نظام من المهد إلى اللحد. EL، لاكتات الإيثيل؛ PLA، حمض البولي لاكتيك؛ PDO، ١،٣-بروبان دايول ؛ PTT ، البولي ثلاثي الميثيلين رباعي الفثالات؛ PHA، البولي هيدروكسي ألكانوات.

يظهر الشكل رقم (٤,١٣) أنه من أجل تعظيم التوفير في انبعاثات غازات الاحتباس الحراري لمنتجات التقنية الحيوية الصناعية فإن قصب السكر يكون مفضلاً عن المواد اللجنوسليولوزية، والتي بدورها أفضل من نشا الذرة كمصدر لسكر التخمير. وفي المناخات المعتدلة مثل أوروبا وأمريكا الشمالية حيث لا يتوفر قصب السكر من الإنتاج المحلي، ينبغي أن تكون المواد اللجنوسليولوزية هي المصادر الأولية المفضلة في المستقبل.

وتكون الوفورات في بعض كيماويات التقنية الحيوية الصناعية المصنوعة من المواد اللجنوسليولوزية وقصب السكر أكبر من ١٠٠٪ (الشكل رقم ٤,١٣)؛ لأن أرصدة الطاقة من الاحتراق الثانوي لنفايات الكتلة الحيوية أو من النفايات الثانوية للإنتاج الزراعي كانت أكبر من الـ NREU لسلسلة عملية التقنية الحيوية الصناعية. وفي المتوسط، فإن وفورات غازات الاحتباس الحراري للتقنية المستقبلية في التقنية الحيوية الصناعية تكون أعلى بـ ٢٥-

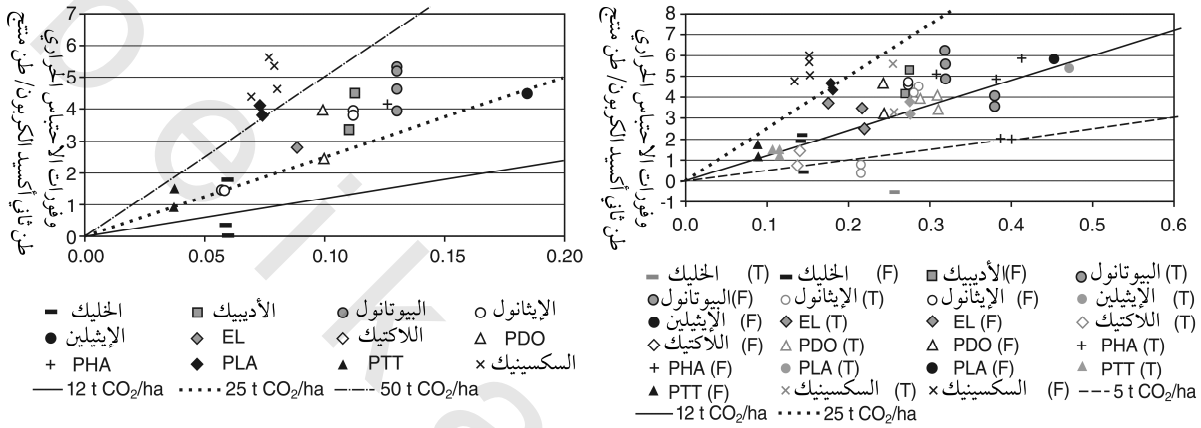
٣٥٪ من التقنية الحالية للتقنية الحيوية الصناعية. يبين هذا أن التقدم التقني يمكن أن يزيد من تعزيز الميزة البيئية لمنتجات التقنية الحيوية الصناعية على مكافئاتها البتروكيماوية.

وقد يرجع انخفاض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري إلى (أ) العائد العالي من التخمير أو (ب) العائد المنخفض من التخمير جنباً إلى جنبٍ مع أرصدة الطاقة الكبيرة من الاحتراق اللاحق للكتلة الحيوية المنتجة ثانوياً. في الحالية الثانية، تتطلب عمليات التخمير غير الفعالة المزيد من الأراضي بشكلٍ كبير لإنتاج الكتلة الحيوية مما تحتاجه التخميرات الفعالة. وإذا أصبح توافر الأراضي محدوداً، فإنه ينبغي تعظيم وفورات غازات الاحتباس الحراري لكمية معينة من الأرض، أو بدلاً من ذلك، ينبغي تقليل استخدام الأراضي لكمية معينة من غازات الاحتباس الحراري ليتم حفظها. وبذلك يحلل الشكل رقم (٥ ,١٣) وفورات غازات الاحتباس الحراري في وقتٍ واحد في جميع طرق التقنية الحيوية الصناعية نسبةً إلى الطريقة البتروكيماوية واستخدام الأراضي بالنسبة للطن الواحد من المواد الكيميائية.

يبين الشكل رقم (٥ ,١٣) أنه توجد علاقة بين نوع المادة الكيميائية وكمية الأراضي المستخدمة لإنتاجها من قصب السكر. لإنتاج طن واحد من حمض كربوكسيلي فإن هناك حاجة لـ ١ ,٠-٢ ,٠ هكتار من الأراضي، في حين أن الكحولات تكون في المدى ٢٥ ,٠-٣٥ ,٠ هكتار/ طن. وبالنسبة للـ PTT، يكون استخدام الأراضي ووفورات غازات الاحتباس الحراري منخفضاً لأنه يتم فقط إنتاج جزء من هذا البوليمر من المواد الأولية القائمة على المصادر الحيوية. وعند وضع وفورات غازات الاحتباس الحراري وانخفاض الأراضي المستخدمة في المقام الأول، فإن حمض السكسينيك، والـ PLA تكون هي الأكثر جاذبية. وتتماشي نتائجنا مع البيانات من الأبحاث المنشورة على المنتجات الفردية بشكلٍ جيد [٢، ٤، ١٤، ١٥، ٣٤، ٤٣] عند أخذ فروق التخصيص في الاعتبار. ينتج عن إنتاج وقود الإيثانول من قصب السكر وفورات ١٠-١٦ طن مكافئ من ثاني أكسيد الكربون/ هكتار [٢٧]. وتظهر الكثير من كيماويات التقنية الحيوية الصناعية وفورات ثاني أكسيد الكربون في الهكتار الواحد أعلى من ١٦ طن مكافئ من ثاني أكسيد الكربون لذلك هي الأفضل من وجهة نظر التخفيف من ثاني أكسيد الكربون.

يظهر الشكل رقم (٥ ,١٣) فقط التقنية المستقبلية للمواد اللجنوسليولوزية؛ لأن الإنتاج التجاري لسكريات التخمير من المواد اللجنوسليولوزية ليس ممكناً بعد على نطاقٍ واسع. وتظهر مقارنة أرقام لقصب السكر والمواد اللجنوسليولوزية في الشكل رقم (٥ ,١٣) أن استخدام الأراضي يكون أفضل بكثير من حيث وفورات ثاني أكسيد الكربون في الهكتار الواحد بالنسبة لحطب الذرة من قصب السكر. ينتج عن تحويل حطب الذرة للمواد الكيميائية باستخدام التقنية المستقبلية دائماً وفورات ثاني أكسيد الكربون تقريباً أعلى من ٢٥ طن/ هكتار. وتوفر الكتلة الحيوية لاستخدام الكهرباء حوالي ١٢ طن مكافئ من ثاني أكسيد الكربون/ هكتار بالنسبة لمحصول القمح

بأكمله [٧] ويوفر استخدام المواد اللجنوسليولوزية في إنتاج وقود الإيثانول ٢–٧ طن مكافئ من ثاني أكسيد الكربون/ هكتار [٢٩][١١]. وعند وضع وفورات ثاني أكسيد الكربون في المقام الأول، يعني هذا أن معظم المواد الكيميائية يتم تفضيلها على الطاقة الحيوية في حالة استخدام قصب السكر كمادة أولية، ويتم تفضيل جميع المواد الكيميائية تقريباً في حالة استخدام حطب الذرة.



الشكل رقم (٥ ,١٣). وفورات غازات الاحتباس الحراري (GHG) مقابل استخدام الأراضي للطن الواحد من الكيماويات للنظام من المهد إلى اللحد. سكر التخمير من المواد اللجنوسليولوزية، التقنية المستقبلية (إلى اليسار) وقصب السكر، والتقنية الحالية (T) والمستقبلية (F) (إلى اليمين). الخطوط مستقيمة هي خطوط أيزو تمثل وفورات ثاني أكسيد الكربون لكل هكتار.

يحدد الجدول رقم (٤ ,١٣) كمية وفورات غازات الاحتباس الحراري المحتملة بافتراض الإحلال الكامل لمكافئات البتروكيماويات ويعتمد على الطاقات الإنتاجية العالمية في السنوات ١٩٩٩/ ٢٠٠٠م [٤٥]. وتتجاهل إمكانية الوفورات الإجمالية للمستقبل نمو الصناعة الكيميائية وفقاً للجدول رقم (٤ ,١٣) (٤٨٥ ميجا طن مكافئ من ثاني أكسيد الكربون لنشا الذرة). والوفورات المستقبلية المحتملة تكون أعلى من ذلك إذا تم استخدام المواد اللجنوسليولوزية (٧٨٧ ميجا طن مكافئ من ثاني أكسيد) أو قصب السكر (٩٩١ ميجا طن مكافئ من ثاني أكسيد) كمصادر أولية. وللمقارنة، فإن انبعاثات غازات الاحتباس الحراري من إنتاج التقنية الحالية من مكافئات البتروكيماويات يؤدي إلى ٨٤٣ ميجا طن مكافئ من ثاني أكسيد لنفس القدرة المثبتة وحدود النظام. ويدل هذا على أن الوفورات المحتملة لغازات الاحتباس الحراري للتقنية الحالية ونشا الذرة كمصدر أولي تصل بالفعل إلى ٤٥٪.

(١١) وفورات غازات الاحتباس الحراري من الإيثانول هنا هي حوالي ٣٣ طن مكافئ من ثاني أكسيد الكربون بسبب نظام المرجع: يحل الإيثانول الكيميائي محل الإيثانول المنتج عن طريق الإيثيلين، في حين أن وقود الإيثانول يحل محل البنزين.

الجدول رقم (٤ ,١٣). الإنتاج السنوي المحتمل في جميع أنحاء العالم وأفضل حالة توفير في غازات الاحتباس الحراري لمنتجات التقنية الحيوية الصناعية الـ ١٥، باستخدام نشا الذرة كمادة أولية، نظام من المهد إلى اللحد.

المنتج		توفير غازات الاحتباس الحراري	مركبة	سنوية
			الطاقة العالمية [٤٨]	توفير غازات الاحتباس الحراري
		(طن ثاني أكسيد الكربون/ طن)	(قيراط/ سنة)	(قيراط ثاني أكسيد الكربون/ سنة)
حمض الخليك	حالياً	-٢ ,٤	٨٣٠٠	غير متاحة
	مستقبلياً	١ ,٢		٩٥٧٠
حمض الأديبيك	حالياً	-٥ ,٢	٢٤٠٠	غير متاحة
	مستقبلياً	٣ ,٣		٧٨٨٠
البيوتانول	حالياً	١ ,٢	٢٤٦٠	٣٠٤٠
	مستقبلياً	٣ ,٩		٩٦١٠
الإيثانول[أ]	حالياً	٢ ,٧	٢٦٠٠	٦٩٧٠
	مستقبلياً	٢ ,٧		٧٠٨٠
الإيثيل أسيتات	حالياً	١ ,٣	١٢٠٠	١٥٨٠
	مستقبلياً	١ ,٩	إيثيل أسيتات	٢٢٢٠
الإيثيلين	حالياً	١ ,٩	١٠٠٠٠٠	١٩١٠٥٠
	مستقبلياً	٢ ,٥		٢٤٥٧١٠
حمض السكسينيك	حالياً	٤ ,٥	١٣٥٠	٦٠٧٠
	مستقبلياً	٥ ,٠	أنهيدريد الماليك	٦٧٨٠
١،٣-بروبان دايول	حالياً	١ ,٨	لاتوجد بيانات	غير متاحة
	مستقبلياً	٢ ,٩		غير متاحة
بولي هيدروكسي الكالونات	حالياً	٢ ,٩	٥٧٠٠٠	١٦٢٧٣٠
	مستقبلياً	٢ ,٨	بولي إيثيلين	١٥٩٦٤٠
حمض البولي لاكتيك	حالياً	٢ ,٣	١١١٠٠	٢٥١٥٠
	مستقبلياً	٣ ,٣	PET	٣٦٥٠٠
الإجمالي	حالياً			٣٩٦٦٠٠
	مستقبلياً			٤٨٥٠٠٠

[أ] نحن ننظر فقط للقدرة المركبة لإنتاج الإيثانول من البتروكيماويات حيث إن الإيثانول الحيوي غالباً ما يستخدم كوقود، في حين أن الإيثانول المستخدم في الصناعة الكيميائية غالباً ينبع من عمليات الإنتاج البتروكيماوية.

obeikandl.com

(١٣,٣,٢) نتائج التحليل الاقتصادي Results of Economic Analysis

تم حساب تكاليف الإنتاج بالإضافة إلى الأرباح (PCPPs) لجميع منتجات التقنية الحيوية الصناعية باستخدام الطريقة الموصوفة أعلاه (انظر الشكل رقم ١٣,٣). يظهر الجدول رقم (١٣,٥) النتائج للنهج العام. وتشير PCPPs البتروكيماويات في الجدول رقم (١٣,٥) إلى المواد القياسية المتطابقة كيميائياً مع المركبات القائمة على المصادر الحيوية، ما لم يرد خلاف ذلك. في حالة حمض اللاكتيك، لايمكن إعطاء مقياس بتروكيماوي لأنه ينتج بالفعل من المصادر الأولية المعتمدة على المصادر الحيوية من التقنية الحيوية الصناعية حالياً، ولذلك تمت المقارنة مع الممارسة الصناعية الحالية. يبين الجدول رقم (١٣,٥) أنه بالنسبة للتقنية الحالية، فإن ثلثين من منتجات التقنية الحيوية الصناعية تكون مجدية اقتصادياً لانخفاض أسعار السكر. الـ PDO، والـ PTT، والـ PLA، وحمض السكسينيك، ولاكتات الإيثيل، والإيثانول هي مجدية اقتصادياً حتى بالنسبة لأسعار السكر العالية جداً (٤٠٠ يورو/ طن).

تتضح هذه النتائج مباشرةً من الشكل رقم (١٣,٦)، الذي يظهر نسبة الـ PCPPs لمنتجات التقنية الحيوية الصناعية الحالية مقارنةً مع نظرائها من البتروكيماويات. تشير القيم الأقل من ١٠٠٪ إلى أن تكاليف الإنتاج تكون أقل لمنتج التقنية الحيوية الصناعية، في حين تمثل القيم الأعلى من ١٠٠٪ الحالات التي يكون فيها إنتاج منتج التقنية الحيوية الصناعية أكثر تكلفة من نظيره في البتروكيماويات. وتتراوح نسبة الـ PCPP لحمض الخليك من ٥٠٠٪ إلى ٦٣٠٪، وتقع بالتالي خارج مدى الشكل رقم (١٣,٦). وعن طريق القياس، يبين الشكل رقم (١٣,٧) نسب الـPCPP لمنتجات التقنية الحيوية الصناعية المستقبلية إلى البتروكيماويات (التقنية الحالية). وتقدم تقريباً جميع المنتجات التي تم بحثها وفورات اقتصادية لسعر السكر من ٧٠ يورو/ طن، باستثناء حمض الخليك.

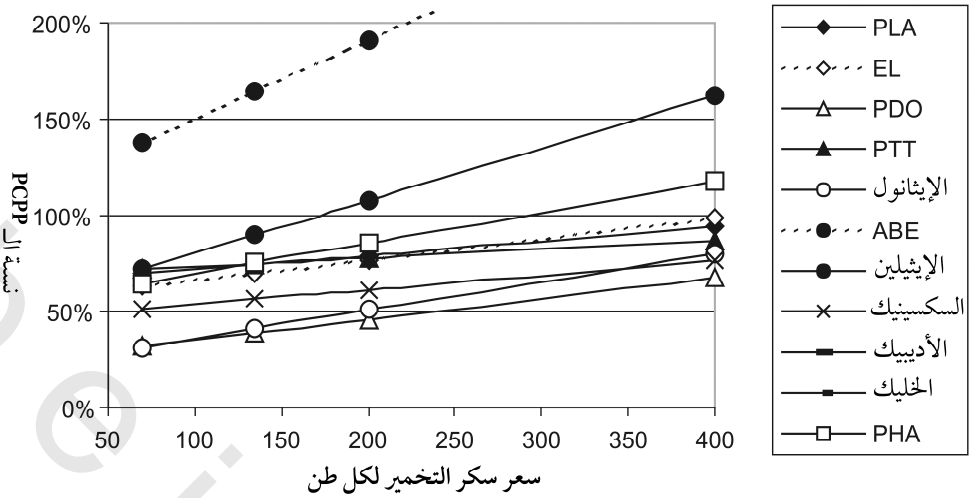
في الختام، يمكن للتقدم التقني أن يساهم بشكلٍ فعال في تحسين الجدوى الاقتصادية لمنتجات التقنية الحيوية الصناعية: تكون الـ PCPPs للمنتجات التي يمكن الحصول عليها مباشرة من التخمير (على سبيل المثال، حمض اللاكتيك) خلال جميع أسعار السكر أقل من التقنية الحالية بـ٢٠-٤٠٪؛ لا يزال التقدم التقني في خطوة التخمير يقلل الـ PCPP تقريباً بنسبة ١٥-٢٠٪ للمنتجات التي تتطلب تحويلاً كيميائياً بعد التخمير (على سبيل المثال، PLA). وتصبح هذه النتائج في كثيرٍ من المنتجات مجدية اقتصادياً في المستقبل، حتى على أسعار عالية نوعاً ما للسكر. ويلخص الجدول رقم (١٣,٦) جدوى كيماويات التقنية الحيوية الصناعية الحالية والمستقبلية لأربعة أسعار من السكر.

الجدول رقم (٥, ١٣). تكلفة الإنتاج بالإضافة إلى الأرباح (يورو/ طن) لمنتجات التقنية الحيوية الصناعية لأسعار السكر المختلفة والتقنية الحالية والمستقبلية وفقاً للنهج العام ومؤشر البتروكيماويات (لـ٧٠ دولار أمريكي/ برميل نفط خام).

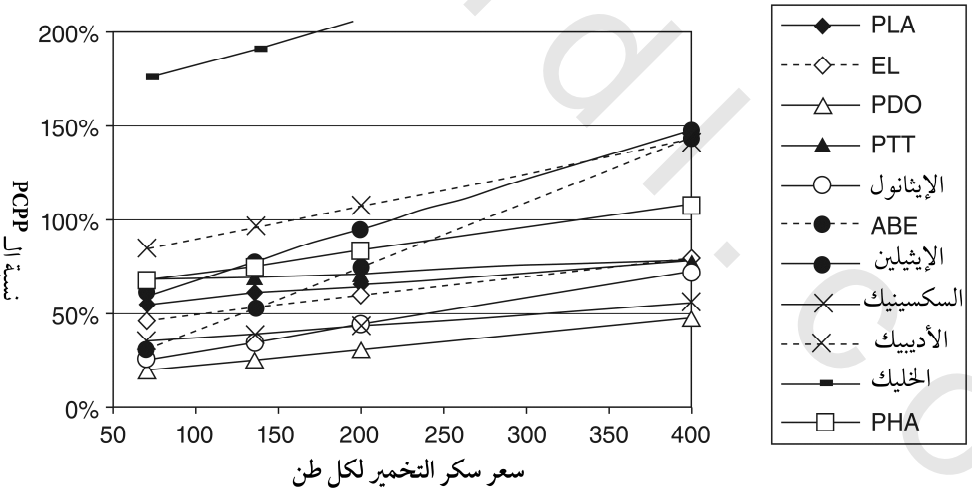
تكلفة الإنتاج بالإضافة إلى الأرباح (يورو/ طن)						
المنتج	التقنية	أسعار سكر التخمير، اعتماداً على المصادر الحيوية				البتروكيماويات
		٧٠ يورو/ طن	١٣٥ يورو/ طن	٢٠٠ يورو/ طن	٤٠٠ يورو/ طن	
ABE	حالياً	١٠٧٠	١٢٧٠	١٤٨٠	٢١١٠	٧٨٠
	مستقبلياً	٢٤٠	٤١٠	٥٨٠	١١١٠	إن-بيوتانول
حمض الخليك	حالياً	٢٥١٠	٢٦٥٠	٢٧٩٠	٣٢٢٠	٥١٠
	مستقبلياً	٩٠٠	٩٨٠	١٠٦٠	١٣٠٠	
حمض الأديبيك	حالياً	٢٩٢٠	٣٣٢٠	٣٧٢٠	٤٩٤٠	١٣٢٠
	مستقبلياً	١١٣٠	١٢٨٠	١٤٣٠	١٨٨٠	
الإيثانول	حالياً	٥٢٠	٦٧٠	٨٢٠	١٣٠٠	١٦٣٠
	مستقبلياً	٤٢٠	٥٧٠	٧٢٠	١١٧٠	
حمض اللاكتيك	حالياً[أ]	٨٥٠	٩٣٠	١٠١٠	١٢٦٠	–
	مستقبلياً	٥٢٠	٦٠٠	٦٨٠	٩١٠	
PDO	حالياً	٧٤٠	٩١٠	١٠٨٠	١٥٩٠	٢٣٤٠
	مستقبلياً	٤٦٠	٥٩٠	٧٢٠	١١٣٠	
PHA	حالياً	١٣٩٠	١٦١٠	١٨٤٠	٢٥٢٠	٢١٥٠
	مستقبلياً	١٤٦٠	١٦٣٠	١٨٠٠	٢٣١٠	*PE*
حمض السكسينيك	حالياً	٨٠٠	٨٨٠	٩٦٠	١٢٠٠	١٥٦٠
	مستقبلياً	٥٥٠	٦٢٠	٦٨٠	٨٩٠	أنهيدريد الماليك
الإيثيل أسيتات	حالياً	١٢٠٠	١٣٣٠	١٤٦٠	١٨٦٠	١٨٩٠
	مستقبلياً	٨٩٠	١٠١٠	١١٤٠	١٥٢٠	الإيثيل أسيتات
الإيثيلين	حالياً	١٠٩٠	١٣٦٠	١٦٣٠	٢٤٦٠	١٥١٠
	مستقبلياً	٩٢٠	١١٨٠	١٤٤٠	٢٢٤٠	
PLA	حالياً[أ]	١٥٠٠	١٦١٠	١٧١٠	٢٠٣٠	٢١٦٠
	مستقبلياً	١٢١٠	١٣١٠	١٤١٠	١٧١٠	PET
PTT	حالياً	١٦٦٠	١٧٢٠	١٧٩٠	١٩٩٠	٢٣٠٠
	مستقبلياً	١٥٥٠	١٦٠٠	١٦٥٠	١٨١٠	

[أ] بيانات العملية مأخوذة من مصادر الصناعة.

obeikandl.com



الشكل رقم (٦ ,١٣). الجدوى الاقتصادية لتقنية التقنية الحيوية الصناعية الحالية: نسبة تكلفة الإنتاج بالإضافة إلى الأرباح (PCPP) لمنتج التقنية الحيوية الصناعية إلى نظيره البتروكيماوي للتقنية الحالية كدالة لمستوى سعر السكر (٧٠ دولاراً أمريكياً/ برميل نفط خام). EL، لاكتات الإيثيل؛ PLA، حمض البولي لاكتيك؛ PDO، ٣،١-بروبان دايول؛ PTT، البولي ثلاثي الميثيلين رباعي الفثالات؛ PHA، البولي هيدروكسي ألكانوات؛ ABE، الأسيتون-بيوتانول-إيثانول.



الشكل رقم (٧ ,١٣). الجدوى الاقتصادية لتقنية التقنية الحيوية الصناعية المستقبلية: نسبة تكلفة الإنتاج بالإضافة إلى الأرباح (PCPP) لمنتج التقنية الحيوية الصناعية مقارنةً بنظيره البتروكيماوي للتقنية المستقبلية كدالة لسعر السكر (٧٠ دولاراً أمريكياً/ برميل نفط خام).

obeikandi.com

الجدول رقم (١٣,٦). جدوى كيماويات التقنية الحيوية الصناعية لأربعة مستويات لأسعار سكر التخمير للتقنية الحالية والمستقبلية (سعر النفط الخام: ٧٠ دولار أمريكي/ برميل).

سعر السكر (يورو/ طن)	حالياً	مستقبلياً
٤٠٠	الإيثانول، PDO، حمض السكسينسك، PTT، PLA والإيثيل لاكتات	نفس الموجود حالياً
٢٠٠	الإيثانول، PDO، حمض السكسينسك، PTT، PLA والإيثيل لاكتات	ABE، الإيثيلين، الإيثانول، PDO، حمض السكسينسك، PTT، PLA والإيثيل لاكتات
١٣٥	الإيثيلين، الإيثانول، PDO، حمض السكسينسك، PTT، PLA والإيثيل لاكتات	حمض الأديبيك، ABE، الإيثيلين، الإيثانول، PDO، حمض السكسينسك، PTT، PLA والإيثيل لاكتات
٧٠	الإيثيلين، الإيثانول، PDO، حمض السكسينسك، PTT، PLA والإيثيل لاكتات	حمض الأديبيك، ABE، الإيثيلين، الإيثانول، PDO، حمض السكسينسك، PTT، PLA والإيثيل لاكتات

(١٣,٤) الاستنتاجات Conclusions

لقد قدمنا وطبقنا في هذا الفصل نهجاً عاماً يسمح بالتقييم المنهجي لطرق الإنتاج الحالية والمستقبلية للكيماويات الحيوية من التقنية الحيوية الصناعية، وذلك استناداً إلى البيانات المتاحة بما يتفق والافتراضات على التطورات التقنية (الحيوية) المستقبلية. وحتى في الوقت الحاضر، فإن المواد الكيميائية الضخمة القائمة على المصادر الحيوية من التقنية الحيوية الصناعية تقدم وفورات واضحة في استخدام الطاقة غير المتجددة وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري بالتقنية الحالية مقارنةً بالإنتاج التقليدي للبتروكيماويات. ويمكن تحقيق المزيد من الوفورات الكبيرة في المستقبل عن طريق عمليات التخمير والتجهيز النهائي المحسنة.

ومن بين جميع المصادر الأولية، يتم تفضيل قصب السكر على المواد اللجنوسليولوزية، والتي تكون بدورها أفضل من نشا الذرة من حيث استخدام الطاقة ووفورات غازات الاحتباس الحراري. والمنتجات ذات أعلى وفورات هي البيوتانول (من عملية ABE)، والإيثانول، والإيثيلين، والـ DDO، والـ PHA.

وبشكلٍ عام، فإن عدداً كبيراً من كيماويات التقنية الحيوية الصناعية يكون مجدياً اقتصادياً بالمقارنة مع مكافئاتها البتروكيماوية. وتعتمد القدرة التنافسية الاقتصادية إلى حدٍ كبير على أسعار النفط والسكر. في حالة سعر النفط الخام٧٠ دولاراً أمريكياً/ برميل تكون المنتجات التالية ذات جدوى اقتصادية بالنسبة للتقنية الحالية: ٣،١-بروبانو دايول، والبولي ثلاثي الميثيلين رباعي الفيثالات، وحمض البولي لاكتيك، وحمض السكسينيك، ولاكتات الإيثيل، والإثيلين، والإيثانول. عند مقارنة التقنية الحالية بالمستقبلية، تكون تكاليف الإنتاج بالإضافة إلى الأرباح

للمنتجات التي يتم الحصول عليها مباشرةً من التخمير ٢٠-٤٠٪ أقل، وبالنسبة للمنتجات التي تتطلب خطوة تحويل كيميائية بعد التخمير ١٥-٢٠٪ أقل (لسعر النفط الخام ٧٠ دولاراً أمريكياً/ برميل، وعند جميع أسعار السكر). ويدل هذا على أن التقدم التقني يمكن أن يسهم بفعالية في الجدوى الاقتصادية المحسنة لكيماويات التقنية الحيوية الصناعية. بالنسبة للتقنية المستقبلية، فإن جميع المنتجات التي درست باستثناء حمض الخليك تكون مجدية اقتصادياً عند أسعار سكر التخمير من ٧٠-١٣٥ يورو/ طن. وتتحسن جميع المنتجات الأخرى في القدرة الاقتصادية التنافسية.

ومن منظور السياسة، فإن المزايا البيئية تجعل إنتاج الكيماويات الضخمة اعتماداً على المصادر الحيوية باستخدام التقنية الحيوية الصناعية مرغوباً فيه على النطاق الواسع؛ لأن وفورات أكثر من ١٠٠٪ في استخدام الطاقة غير المتجددة وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري ممكنة بالفعل على المستوى الحالي للتقنية الحيوية. ويشكل هذا حجةً قوية لإنتاج الكيماويات الضخمة اعتماداً على المصادر الحيوية باستخدام التقنية الحيوية الصناعية عند النظر في المزايا الاقتصادية للـ ٣،١-بوبان دايول، والبولي ثلاثي الميثيلين رباعي الفثالات، وحمض البولي لاكتيك، وحمض والسكسينيك، ولاكتات الإيثيل، والإيثيلين، والإيثانول للتقنية الحالية ولجميع المنتجات باستثناء حمض الخليك للتقنية المستقبلية (انظر [١١] لأسعار النفط الأخرى). ونتيجةً لذلك، فإن استخدام التقنية الحيوية الصناعية لإنتاج الكيماويات اعتماداً على المصادر الحيوية يمكن أن يساهم بشكلٍ كبير للحد من تغير المناخ واستنفاد الطاقة الحفرية. ولذلك فإنها تكون إستراتيجية رئيسة للتنمية المستدامة للصناعة الكيميائية. ولهذا فإن الإدخال واسع المستوى لإنتاج الكيماويات الضخمة المجدية اقتصادياً الذي يعتمد على المصادر الحيوية باستخدام التقنية الحيوية الصناعية يكون مرغوباً فيه لهذه المنتجات التي تكون آثارها البيئية أصغر من تلك بالنسبة لطرق الإنتاج البتروكيماوية الحالية. وفي ظل هذه الظروف، يمكن أن تصبح التقنية الحيوية الصناعية مركز الاهتمام بالنسبة للصناعة الكيميائية، وكذلك بالنسبة لصناع القرار.

المراجع References

[١] Aden, A., Ruth, M., Ibsen, K., Jechura, J., Neeves, K., Sheehan, J., Wallace, B., Montague, L., Slayton, A., and Lukas, J. (2002) Ligno-cellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover. Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL).

[٢] Akiyama, M., Tsuge, T., and Doi, Y. (2003) Environmental life cycle comparison of poly-hydroxyalkanoates produced from renewable carbon resources by bacterial fermentation. *Polym. Degrad. Stab.*, **80** (1), 183-194.

[٣] Bayrock, D. and Ingledew, W. (2005) Ethanol production in multistage continuous, single stage continuous, lactobacillus-contaminated continuous, and batch fermentations. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, **21** (1), 83-88.

[٤] Bohlmann, G.M. (2004) Biodegradable packaging life-cycle assessment. *Environ. Prog.,* **23** (4), 342-346.

[٥] Campos, E., Qureshi, N., and Blascheck, H. (2002) Production of acetone butanol ethanol from degermed corn using *Clostridium beijerinckii* ba101. *Appl. Biochem. Biotechnol.,* **99** (1-3), 553-576.

[٦] Damen, K. (2001) Future prospects for biofuel production in Brazil; A chain analysis comparison of ethanol from sugarcane and methanol from eucalyptus in Sao Paulo state. Master thesis NWS-E-2001-31, Utrecht University.

[٧] Dornburg, V., Termeer, G., and Faaij, A.P. (2005) Economic and greenhouse gas emission analysis of bioenergy production using multi-product crops-case studies for the Netherlands and Poland. *Biomass Bioenergy,* **28** (5), 454-474.

[٨] Ezeji, T., Qureshi, N., and Blascheck, H. (2003) Production of acetone, butanol and ethanol by *Clostridium beijerinckii* ba101 and in situ recovery by gas stripping. *World J. Microbiol. Biotechnol.,* **19** (6), 595-603.

[٩] Fidaleo, M. and Moresi, M. (2005) Modeling of sodium acetate recovery from aqueous solutions by electrodialysis. *Biotechnol. Bioeng.,* **91** (5), 556-568.

[١٠] Gryta, M., Morawski, A.W., and Tomaszewska, M. (2000) Ethanol production in membrane distillation bioreactor. *Catal. Today,* **56,** 159-165.

[١١] Hermann, B.G. and Patel, M. (2007) Today's and tomorrow's bio-based bulk chemicals from white biotechnology-a techno-economic analysis. *Appl. Biochem. Biotechnol.,* **136** (3), 361-388.

[١٢] Huang, Y., Mann, K., Novak, J., and Yang, S. (1998) Acetic acid production from fructose by *Clostridium formicoaceticum* immobilized in a fibrous-bed bioreactor. *Biotechnol. Prog.,* **14** (5), 800-806.

[١٣] Huijbregts, M., Rombouts, L.J., Hellweg, S., Frischknecht, R., Hendriks, A., van de Meent, D., Ragas, A.M., Reijnders, L., and Struijs, J. (2006) Is cumulative fossil energy demand a useful indicator for the environmental per-formance of products? *Environ. Sci. Technol.,* **40** (3), 641-648.

[١٤] Kim, S., and Dale, B.E. (2005) Environmental aspects of ethanol derived from no-tilled corn grain: nonrenewable energy consumption and greenhouse gas emissions. *Biomass Bioenergy,* **28** (5), 475-489.

[١٥] Kim, S., and Dale, B.E. (2005) Life cycle assessment study of biopolymers (PHA)-derived from no-tilled corn. *Int. J. LCA,* **10** (2), 200-210.

[١٦] Landucci, R., Goodman, B., and Wyman, C. (1994) Methodology for evaluating the economics of biologically producing chemicals and materials from alternative feedstocks. *Appl. Biochem. Biotechnol.,* **45-46,** 677-696.

[١٧] Lee, J., Pagan, R., and Rogers, P.L. (1983) Continuous simultaneous saccharification and fermentation of starch using zymomonas mobilis. *Biotechnol. Bioeng.,* **25** (3), 659-669.

[١٨] Lee, K.-R., Teng, M.-Y., Lee, H.-H., and Lai, J.-Y. (2000) Dehydration of ethanol/water mixtures by pervaporation with composite membranes of polyacrylic acid and plasma-treated polycarbonate. *J. Memb. Sci.,* **164,** 13-23.

[١٩] Lee, P.C., Lee, W.G., Lee, S.Y., Chang, H.N., and Chang, Y.K. (2000) Fermentative production of succinic acid from glucose and corn steep liquor by *Anaerobiospirillium succiniproducens*. *Biotechnol. Bioprocess Eng.,* **5,** 379-381.

[٢٠] Lee, Y.Y., Balasubramanian, N., and Kim, J. (2001) Fermentation of xylose into acetic acid by *Clostridium thermoaceticum*. *Appl. Biochem. Biotechnol.,* **92** (1-3), 367-376.

[٢١] Lynd, L. and Wang, M. (2004) A product non-specific framework for evaluating the potential of biomass-based products to displace fossil fuels. *J. Ind. Ecol.,* **7** (3-4), 17-32.

[٢٢] Macedo, I.C. (1998) Greenhouse gas emissions and bio-ethanol in Brazil. *Int. Sugar J.,* **100** (1189), 2-5.

[٢٣] Niu, W., Draths, K., and Frost, J. (2002) Benzene-free synthesis of adipic acid. *Biotechnol. Prog.,* **18,** 201-211.

[٢٤] New York Board of Trade (2005) Historical data-sugar 11. https://www.theice.com/product guide/Reports.shtml?specId=23

[٢٥] New York Board of Trade (2005) Historical data-sugar 14. https://www.theice.com/product guide/Reports.shtml? specId=23

[٢٦] ORPLANA (2005) Sugarcane payment in the Sao Paulo state-in the 2003/04 season. http:// www.orplana.com.br/estatisticas.asp accessed 31.10.2005.

[٢٧] Patel, M., Crank, M., Dornburg, V., Hermann, B.G., Roes, L., Using, B.H., Overbeek, L., Terragni, F., and Recchia, E. (2006) Medium and long-term opportunities and risks of the biotechnological production of bulk chemicals from renewable resources-the potential of white biotechnology. The BREW project. Project report, Utrecht University.

[٢٨] Patel, M., Jochem, E., Marscheider-Weidemann, F., Radgen, P., and von Thienen, N. (1999) C-STREAMS-Estimation of material, energy and CO2 flows for model systems in the context of non-energy use, from a life cycle perspective. Status and scenarios, vol. I: Estimates for the total system. Technical report, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI).

[٢٩] Quirin, M., Artner, S.O.G., Pehnt, M., and Reinhardt, G.A. (2004) CO2 mitigation through biofuels in the transport sector-status and perspectives. Technical report, Institut f. Energie-und Umweltforschung (IFEU) Heidel-berg GmbH.

[٣٠] Qureshi, N. and Blascheck, H. (2001) Abe production from corn: a recent economic evaluation. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, **27,** 292-297.

[٣١] Reddy Kunduru, M. and Pometto, A. (1996) Continuous ethanol production by *Zymomonas mobilis* and *Saccharomyces cerevisiae* in biofilm reactors. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, **16** (4), 249-256.

[٣٢] Reismann, H. (1988) *Economic Analysis of Fermentation Processes,* CRC Press, Florida.

[٣٣] Rupp-Dahlem, C. (2005) Time series on London no.5 sugar prices, 03.11.2005, personal communication.

[٣٤] Sheehan, J., Aden, A., Paustian, K., Killian, K., Brenner, J., Walsh, M., and Nelson, R. (2003) Energy and environmental aspects of using corn stover for fuel ethanol. *J. Ind. Ecol.*, **7** (3-4), 117-146.

[٣٥] Simons, P. and Nossin, P. (2005) Investment cost calculations (fum). Technical report, DSM.

[٣٦] SRI (1999) 1,3-Propanediol and polytrimethyl-ene terephthalate. Technical report PEP 227, SRI Consulting.

[٣٧] SRI (2000) *PEP Yearbook International, Volume 2M Germany of Process Economics Program,* SRI Consulting, Menlo Park, CA.

[٣٨] SRI (2001) Chemicals from renewable resources. Technical report PEP 236, SRI Consulting.

[٣٩] SRI (2002) Biotechnology separation processes. Technical report PEP 188B, SRI Consulting.

[٤٠] SRI (2002) Polyhydroxyalkanoates from organic wastes. Technical report PEP 2002-8, SRI Consulting.

[٤١] Vink, E.T., Hettenhaus, J., Kim, S., and Dale, B.E. The Life Cycle of Natureworks™ Poly-lactide. 1. Corn production inventory data and corn production eco-profile. Unpublished report, Cargill Dow BV.

[٤٢] Vink, E.T., Hettenhaus, J., O'Connor, R., Dale, B.E., Tsobanakis, P., and Stover, D. The Life Cycle of Natureworks™ Polylactide. 2. The production of dextrose via corn wet milling. Unpublished report, Cargill Dow BV.

[٤٣] Vink, E.T., Abago, K.R., Glassner, D., and Gruber, P. (2003) Applications of life cycle assessment to Natureworks™ polylactide (PLA) production. *Polym. Degrad. Stab.*, **80** (3), 403-419.

[٤٤] Weidema, B. (2000) Avoiding co-product allocation in life-cycle assessment. *J. Ind. Ecol.*, **4** (3), 11-33.

[٤٥] Weissermel, K. and Arpe, H.-J. (2003) *Industrial Organic Chemistry,* 4th edn,Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.

[٤٦] Wibowo, C., Chang, W.-C., and Ng, K.M. (2001) Design of integrated crystallization systems. *AIChE J.*, **47** (11), 2474-2492.

[٤٧] Wisniewski, M. and Pierzchalska, M. (2005) Recovery of carboxylic acids c1-c3 with organophosphine oxide solvating extractants. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **80** (12), 1425-1430.

[٤٨] Zeikus, J., Jain, M., and Elankovan, P. (1999) Biotechnology of succinic acid production and markets for derived industrial products. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **51** (5), 545-552.