



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
Μ.Π.Ε.: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ
ΘΕΜΑ: «ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ»
«TRENDS AND FUTURE OPPORTUNITIES FOR ENERGY EXPLOITATION OF BIOGAS

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ
ΣΠΥΡΙΔΩΝ Γ. ΤΣΕΠΕΝΕΚΑΣ

A. M. : 115567

ΟΝΟΜΑ ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΑ ΚΑΘΗΓΗΤΗ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΒΑΙΟΣ ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗΣ

ΠΑΤΡΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2018

Contents

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : Ενεργειακή πολιτική	8
1.1 Ενεργειακή πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	8
1.2 Ενεργειακή πολιτική και νομοθεσία στην Ελλάδα	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : Βιομάζα	12
Εισαγωγή	12
2.1. Η βιομάζα ως εναλλακτική πηγή ενέργειας.....	12
2.2. Προέλευση	12
2.2.1. Βιομάζα από τον γεωργικό τομέα	13
2.2.2. Βιομάζα από τον βιομηχανικό τομέα.....	17
2.2.3. Βιομάζα αστικών αποβλήτων.....	18
2.2.4. Υδάτινη βιομάζα	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : Μέθοδοι ενεργειακής αξιοποίησης του βιοαερίου	20
Εισαγωγή.....	20
3.1. Τεχνολογίες αναβάθμισης και καθαρισμού του βιοαερίου	20
3.1.1. Προσρόφηση	21
3.1.2 Απορρόφηση	22
3.1.3. Διαχωρισμός με μεμβράνες.....	24
3.1.4. Κρυογονικός διαχωρισμός	25
3.1.5. Καινοτόμος εναλλακτική βιολογική μέθοδος αναβάθμισης	26
3.2. Επιλογές ενεργειακής αξιοποίησης του βιοαερίου	27
3.2.1. Χρήση του βιοαερίου προς παραγωγή θερμότητας και ατμού.	29
3.2.2. Χρήση του βιοαερίου για την παραγωγή ρεύματος και θερμότητας.....	29
3.2.3. Παραγωγή H ₂ από το βιοαέριο	31
3.2.4. Εισαγωγή του βιοαερίου στο δίκτυο του φυσικού αερίου.....	32
3.2.5. Μετετροπή του βιοαερίου σε bio-CNG και η χρήση του ως καύσιμο οχημάτων	33
3.2.6. Σύγκριση των μεθόδων αξιοποίησης του βιοαερίου.	34
Κεφάλαιο 4 ^ο : Εφαρμογές ενεργειακής αξιοποίησης του Βιοαερίου	36
Εισαγωγή	36
4.1. Εφαρμογές ενεργειακής αξιοποίησης του βιοαερίου διεθνώς.....	36
4.1.1. Αξιοποίηση βιοαερίου στην Κίνα	37
4.1.2. Αξιοποίηση βιοαερίου στην Λατινική Αμερική	43
4.1.3. Αξιοποίηση βιοαερίου στις Ηνωμένες Πολιτείες.....	43

4.1.4. Αξιοποίηση βιοαερίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση.....	44
4.2 Αξιοποίηση βιοαερίου στην Ελλάδα	46
4.6. Ανακεφαλαίωση.....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : Προοπτικές στην ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου	51
Εισαγωγή	51
5.1 Προοπτικές αξιοποίησης του βιοαερίου στην Ελλάδα	51
5.2 Το μέλλον του βιοαερίου στην Ευρώπη	57
5.3 Προοπτικές εξέλιξης της αναερόβιας χώνευσης	59
5.3.1 Αυτοματοποίηση της αναερόβιας χώνευσης	60
5.4 Ανακεφαλαίωση	62
Κεφάλαιο 6 ^ο : Συμπεράσματα.....	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	64

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Επιβλέποντα καθηγητή μου κο Βάιο Καραγιάννη που σε όλη αυτή την προσπάθεια στάθηκε δίπλα μου όλο το Ακαδημαϊκό Έτος 2017 – 2018 παρακολουθώντας με πολύ ενδιαφέρον την πορεία και την εξέλιξη του θέματος καθοδηγώντας με τις συμβουλές του και τις διορθώσεις του οποιαδήποτε στιγμή του ζητήθηκε ώστε να επιτευχθεί ένα σωστό αποτέλεσμα και στον καθηγητή κο Ιωάννη Καλαβρουζιώτη Δ/ντη του ΜΠΣ «Διαχείριση Αποβλήτων».

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου είναι ιδιαίτερως σημαντική διότι ταυτόχρονα γίνεται αρωγός στην διαχείριση των αποβλήτων και στην παραγωγή ανανεώσιμης μορφής ενέργειας, φιλικά περιβαλλοντικής, μειώνοντας την χρήση των πόρων αλλά και των ρυπογόνων καυσίμων. Με την παραγωγή και χρήση του βιοαερίου συμβάλλουμε στον εθνικό στόχο δράσης για την συμβολή των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας με ποσοστό 20% έως το 2020. Το βιοαέριο παράγεται από αρνητικής αξίας προϊόν όπως είναι η βιομάζα των κτηνοτροφικών αποβλήτων, των αποβλήτων ελαιοτριβείου, τυροκομείου, το παραπροϊόν από την παραγωγή Biodiesel, τα οργανικά απόβλητα των ΧΥΤΑ κ.α. Στην συνέχεια μπορεί να αξιοποιηθεί ως καύσιμο για οχήματα ή κυψέλες καυσίμων, να διοχετευθεί στο δίκτυο του φυσικού αερίου, να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για θέρμανση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ελαχιστοποίηση των κοινωνικών φραγμών, οικονομικών, γραφειοκρατικών, νομοθετικών και χωροταξικών εμποδίων θα οδηγήσει στην ανάδειξη του βιοαερίου ως μια εφικτή ΑΠΕ. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η ενεργειακή πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης καθώς και η ενεργειακή πολιτική και η νομοθεσία στην Ελλάδα όσον αφορά την παραγωγή και αξιοποίηση του βιοαερίου. Στην συνέχεια αναλύεται η έννοια της βιομάζας ως εναλλακτική μορφή ενέργειας, τα είδη και η προέλευση της. Ακολουθεί η παρουσίαση των μεθόδων καθαρισμού και αναβάθμισης του βιοαερίου καθώς και οι τρόποι ενεργειακής αξιοποίησης του. Στο τέταρτο κεφάλαιο επιδιώκεται η παρουσίαση των μεθόδων ενεργειακής αξιοποίησης σε μεγάλες χώρες όπως η Κίνα και οι Ηνωμένες Πολιτείες, σε περιοχές με κοινή ενεργειακή πολιτική όπως είναι η Λατινική Αμερική και η Ευρώπη καθώς και στην Ελλάδα. Στο πέμπτο κεφάλαιο, αναλύονται οι προοπτικές που ενδεχόμενος να έχει ο τομέας της παραγωγής βιοαερίου και η ενεργειακή αξιοποίηση του για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων και την προστασία του περιβάλλοντος. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

ABSTRACT

Energy use of biogas is particularly important and at the same time support waste management and the production of environmentally friendly renewable energies, reducing the use of resources and pollutants that cause pollution. With the production and use of biogas, it contributes to the National Action Plan for the contribution of RES to energy consumption by 20% by 2020. Biogas is produced from negative-value products, such as biomass of animal waste, agriculture waste, dairy, the by-product from Biodiesel production, organic waste from landfills etc . It can then be used as a fuel for vehicles or fuel cells, fed into the natural gas network, used as fuel for heating and electricity generation. Minimizing social barriers, eco-tax, bureaucratic, legislative and land-use barriers will lead to the emergence of biogas as a feasible RES. This paper presents the energy policy of the European Union as well as the energy policy and the legislation of Greece, with regard to the production and utilization of biogas. Biomass is then analyzed as an alternative form of energy, its species and its origin. Below is the presentation of the methods of cleaning and upgrading biogas and its energy utilization. The fourth chapter seeks to present energy use methods in major countries such as China and the United States, in areas with a common energy policy such as Latin America and Europe, as well as Greece. In the fifth chapter, the prospects of the biogas production sector is analyzed and its energy utilization in order to meet the energy requirements and protect the environment. Finally, chapter six sets out the conclusions of this paper.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1	9
<i>Εικόνα 1: Σύγχρονες τεχνολογίες αναβάθμισης του βιοαερίου. (Τροποποίηση από: Khan et al., 2017)</i>	21
<i>Εικόνα 2: Σύγχρονες τεχνολογίες αξιοποίησης του βιοαερίου. (Τροποποίηση από: Khan et al., 2017)</i>	28
<i>Εικόνα 3: Πηγή: (Deublein and Steinhauser,2011).</i>	30
<i>Εικόνα 5.1: Ποσοτική ανάλυση των αναερόβιων χωνευτών στην Κίνα από το 2000 έως 2014 (Πηγή: Bin Chen, Tasawar Hayat, Ahmed Alsaedi (2017))</i>	38
<i>Εικόνα 5.2: Σύστημα «τρία σε ένα» για την παραγωγή και αξιοποίηση βιοαερίου (Πηγή: Yang and Chen 2014)</i>	42
<i>Εικόνα 5.3: Η εξέλιξη της πρωτογενούς παραγόμενης ενέργεια από βιοαέριο. (Πηγή: Eurostat, 2017)</i>	45
<i>Εικόνα 5.4: Ο αριθμός και το είδος των μονάδων βιοαερίου ανά Ευρωπαϊκή χώρα. (Πηγή: EBA, 2016)</i>	46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Ενεργειακή πολιτική

Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αποτελείται από δύο ενότητες. Στην πρώτη ενότητα περιγράφεται η ενεργειακή πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης ενώ στην δεύτερη ενότητα περιγράφεται η νομοθεσία και η ενεργειακή πολιτική της Ελλάδος.

1.1 Ενεργειακή πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Η Ευρώπη αντιμετωπίζει μια σειρά από προκλήσεις όπως η αυξανόμενη ζήτηση για ενέργεια, η αστάθεια των ενεργειακών τιμών και οι διαταραχές στον ενεργειακό εφοδιασμό. Ταυτόχρονα είναι επιτακτική η ανάγκη μείωσης του αντίκτυπου του τομέα της ενέργειας στον περιβάλλον, με την εισαγωγή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Η ενεργειακή πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με βάση την συνθήκη της Λισαβόνας, επιδιώκει να διασφαλίζει την λειτουργία της αγοράς ενέργειας και τον ενεργειακό εφοδιασμό της Ένωσης, να προωθεί την διασύνδεση των δικτύων, την ενεργειακή αποδοτικότητα, την εξοικονόμηση ενέργειας και την ανάπτυξη νέων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

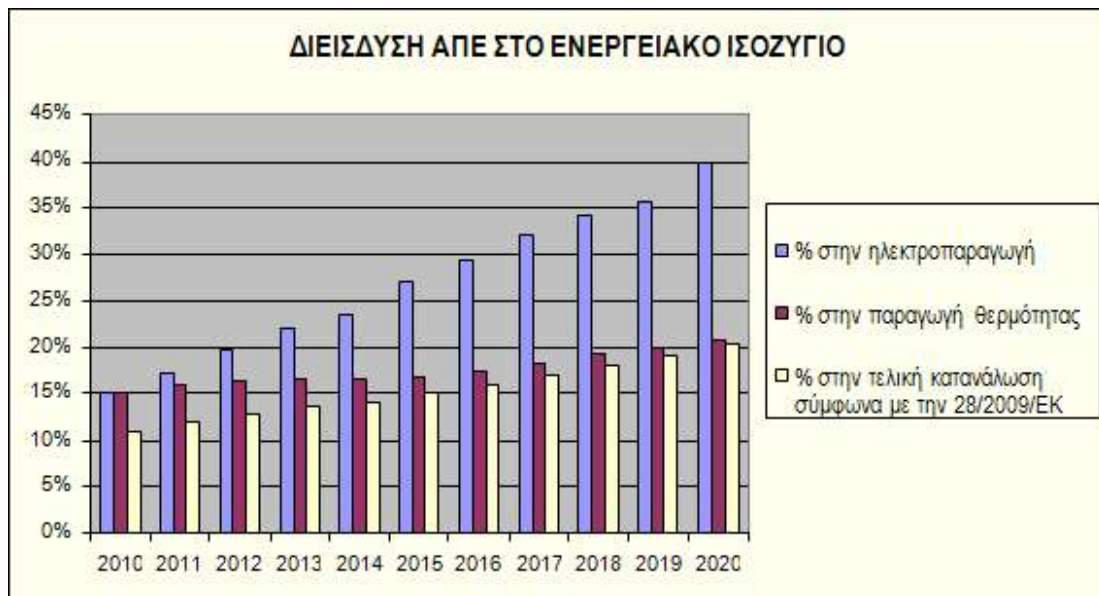
Το γενικό πλαίσιο πολιτικής περιλαμβάνει:

- Την ατζέντα για την προστασία του κλίματος και την ενέργεια, η οποία επιδιώκεται να επιτευχθεί έως το 2020 και περιλαμβάνει α) την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 20%, σε σχέση με τις τιμές του 1990 β) την αύξηση του ποσοστού των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ενεργειακή κατανάλωση σε 20% και γ) την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 20%
- Την πράσινη βίβλο: «Πλαίσιο για τις πολιτικές που αφορούν το κλίμα και την ενέργεια με χρονικό ορίζοντα το έτος 2030»

- Μακροπρόθεσμα σενάρια με τίτλο: «Ενεργειακός χάρτης πορείας για το 2050» ο οποίος αντανακλά τους στόχους της Ε.Ε. για την απαλλαγή από ανθρακούχες πηγές με μεταστροφή προς νέες τεχνολογίες,

1.2 Ενεργειακή πολιτική και νομοθεσία στην Ελλάδα

Για την εναρμόνιση της ενεργειακής πολιτικής της Ελλάδα με τις προσαγές της Ε.Ε που απορρέουν από την Οδηγία 2009/98/ΕΚ, έχει διαμορφωθεί το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για την για την επίτευξη της συμβολής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% έως το 2020. Η Εκθεση του Εθνικού Σχεδίου Δράσης περιλαμβάνει εκτιμήσεις για την πορεία του ενεργειακού τομέα και την διείσδυση των τεχνολογιών των ΑΠΕ έως το 2020. Στο γράφημα που ακολουθεί φαίνεται η εξέλιξη του ποσοστού διείσδυσης των ΑΠΕ σε δύο βασικούς τομείς, της ηλεκτροπαραγωγής και της παραγωγής θερμότητας από το 2010 έως το 2020.



Εικόνα 1

Το Νομοθετικό πλαίσιο που ακολουθεί την ενεργειακή πολιτική της Ελλάδος για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας συμπεριλαμβανομένου και του βιοαερίου είναι το εξής:

1. Νόμος 2244/1994 «Ρύθμιση θεμάτων ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και από συμβατικά καύσιμα και άλλες διατάξεις» (ΦΕΚ Α' 168/1994). Ο νόμος αυτός αποτελεί τη βάση για την έναρξη της δυνατότητας ηλεκτροπαραγωγής από ιδιωτικές ΑΠΕ.

2. Νόμος 2773/99 «Ρύθμιση θεμάτων Ηλεκτροπαραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και από συμβατικά καύσιμα και άλλες διατάξεις» (ΦΕΚ 286/Α/99). Ο νόμος αυτός αποτελεί την βάση σε θέματα ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ και απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας (ενσωματώνει σε σημαντικό βαθμό το Νόμο 2244/94).

3. Νόμος 3423/2005 «Εισαγωγή στην Ελληνική Αγορά των Βιοκαυσίμων και των άλλων Ανανεώσιμων Καυσίμων» (ΦΕΚ 304/Α/05). Η Οδηγία 2003/30/ΕΚ μεταφέρθηκε στο εθνικό δίκαιο μέσω αυτού το νόμου για την προώθηση των βιοκαυσίμων.

4. Νόμος 3468/2006 «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συμπαγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης και λοιπές διατάξεις (ΦΕΚ 129/Α/06).

5. Νόμος 3851/2010 «Επιτάχυνση της ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του υπουργείου περιβάλλοντος , Ενέργειας και Κλιματικής αλλαγής». Τέθηκε σε εφαρμογή τον Ιούνιο του 2010 για να αναμορφώσει το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο των ΑΠΕ και ειδικότερα τον νόμο 3486/2006.

Για την διείσδυση των ΑΠΕ και κατεπέκταση της βιομάζας και του βιοαερίου στο ενεργειακό σύστημα με αντικατάσταση των συμβατικών ενεργειακών πηγών αναπτύχθηκαν δύο μηχανισμοί α) η εγγυημένη τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας και β) η δημόσια χρηματοδότηση έργων ΑΠΕ.

Οι κύριοι άξονες ενεργειακής πολιτικής στην Ελλάδα συνοψίζονται ως εξής:

Α) Ο ενεργειακός εφοδιασμός να γίνεται με ασφάλεια

Β) Η Διαφοροποίηση ενεργειακών πηγών

Γ) Η προστασία του περιβάλλοντος

Δ) Η προώθηση της παραγωγικότητας και της ανταγωνιστικότητας μέσω ενεργειακών επενδύσεων εξασφαλίζοντας παράλληλα την περιφερειακή ανάπτυξη.

Τα επόμενα χρόνια ο ενεργειακός τομέας θα συνεχίσει να αποτελεί υψηλής προτεραιότητας στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Ελλάδα επιδιώκοντας μια καλή συνεργασία και μια κοινή ευρωπαϊκή πολιτική η οποία θα είναι και η μόνη βιώσιμη λύση για το μέλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Βιομάζα

Εισαγωγή

Το δεύτερο κεφάλαιο συντίθεται από τρεις ενότητες. Στην πρώτη ενότητα περιγράφεται η έννοια της βιομάζας. Στην δεύτερη ενότητα περιγράφεται η βιομάζα που προέρχεται από τον γεωργικό τομέα, η βιομάζα που προέρχεται από τον βιομηχανικό τομέα, η βιομάζα των αστικών αποβλήτων και η υδάτινη βιομάζα.

2.1. Η βιομάζα ως εναλλακτική πηγή ενέργειας

Η βιομάζα είναι ο γενικός όρος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή όλων των βιολογικά παραγόμενων υλικών και επομένως περιλαμβάνει όλα τα είδη υλικών και ουσιών που προέρχονται από ζωντανούς οργανισμούς. Η βιομάζα χρησιμοποιείται ευρέως για ενεργειακούς σκοπούς και παρέχει σήμερα περίπου 50 EJ παγκοσμίως, το οποίο αντιπροσωπεύει περίπου το 10% της παγκόσμιας ετήσιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας (Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας, 2010).

Σύμφωνα με το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας, εξακολουθεί να υπάρχει σημαντική δυνατότητα επέκτασης της βιομάζας για ενεργειακή χρήση, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής βιοαερίου, με την αξιοποίηση των μεγάλων ποσοτήτων αχρησιμοποίητων υπολειμμάτων και αποβλήτων.

2.2. Προέλευση

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 28/2009: Βιομάζα είναι «το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και καταλοίπων βιολογικής προέλευσης από τη γεωργία (συμπεριλαμβανομένων των φυτικών και των ζωικών ουσιών), τη δασοκομία και τους συναφείς κλάδους, την αλιεία και την

υδατοκαλλιέργεια - καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των βιομηχανικών αποβλήτων και των οικιακών απορριμμάτων»

Κατηγορίες βιομάζας κατάλληλες ως πρώτες ύλες για την παραγωγή βιοαερίου

Οι πηγές βιομάζας που υπόκεινται στην παραγωγή βιοαερίου μπορούν να ταξινομηθούν, ανάλογα με την προέλευση τους σε φυτικές και ζωικές και ανάλογα με τον τομέα παραγωγής τους σε γεωργικές, βιομηχανικές, και αστικές, και υδάτινες.

Βέβαια, η χρήση της υδάτινης βιομάζας ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοαερίου είναι ακόμη σε ερευνητικό στάδιο, όμως αναδεικνύεται ως ο τύπος βιομάζας με τις μεγαλύτερες δυνατότητες παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας καθώς μπορεί να αξιοποιηθεί στην βιομηχανία και ως πιθανή μελλοντική εναλλακτική λύση στις ενεργειακές καλλιέργειες.

2.2.1. Βιομάζα από τον γεωργικό τομέα

Τα υποστρώματα πρώτης ύλης που χρησιμοποιούνται για το βιοαέριο προέρχονται κατά κύριο λόγο από τον γεωργικό τομέα, ο οποίος αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο δυναμικό για τις πρώτες ύλες βιοαερίου (Steffen et al., 1998).

Αυτές οι πρώτες ύλες αποτελούνται κυρίως από διάφορα υπολείμματα και υποπροϊόντα, από τα οποία τα σημαντικότερα είναι οι ζωικές στερεές και υγρές κοπριές που συλλέγονται από κτηνοτροφικές μονάδες (από βοοειδή, χοίρους, πουλικά κ.λπ.). Μαζί με την κοπριά χρησιμοποιούνται επίσης υπολείμματα καλλιεργειών, υποπροϊόντα και απόβλητα (π.χ. άχυρο, χόρτα, φύλλα, φρούτα, ολόκληρα φυτά). Κατά την τελευταία δεκαετία, δοκιμάστηκαν νέες κατηγορίες πρώτων υλών που πλέον χρησιμοποιούνται σε μονάδες αναερόβιας χώνευσης όπως οι ενεργειακές καλλιέργειες (αραβόσιτος, χόρτα, τεύτλα, ηλίανθος κλπ.), που καλλιεργούνται ειδικά για την παραγωγή βιοαερίου.

Ζωικής προέλευσης στερεή και υδαρή κοπριά

Κάθε χρόνο παγκοσμίως το 18% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου παράγονται από τον αγροτοβιομηχανικό τομέα, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων προέρχεται από τα περίπου 13 δις τόνων κοπριάς που παράγονται ετησίως.

Τα χαρακτηριστικά της κοπριάς είναι ιδανικά για υπόστρωμα στην αναερόβια χώνευση αφού: ο λόγος C:N είναι περίπου 25:1 και είναι πολύ πλούσια σε θρεπτικά απαραίτητα για την ανάπτυξη των αναερόβιων μικροοργανισμών. Η υψηλή περιεκτικότητα ύδατος στην κοπριά διασφαλίζει καλές συνθήκες ανάδευσης στον χωνευτήρα και την ομοιογένεια του μείγματος τροφοδοσίας. Επίσης έχει υψηλή ρυθμιστική ικανότητα, ικανή να σταθεροποιήσει τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης σε περίπτωση σημαντικής μείωσης του pH στο εσωτερικό του χωνευτή, έχει φυσικό περιεχόμενο σε αναερόβιους μικροοργανισμούς, είναι ιδιαίτερα προσβάσιμη και είναι φθηνή.

Από την άλλη πλευρά, η κοπριά λόγω του χαμηλού ποσοστού ξηρής ύλης αποδίδει χαμηλό ποσοστό μεθανίου ανά κυβικό μέτρο χωνευμένης υδαρούς κοπριάς (Angelidaki, 2002). Ακόμη η λιγνοκυτταρίνη που περιέχουν τα άχυρα και οι ίνες είναι ανθεκτική στην αποσύνθεση οπότε περνάει από τον αντιδραστήρα χωρίς καμία συνεισφορά στην χώνευση.

Με βάση τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κοπριάς που αναφέρθηκαν παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η αναερόβια χώνευση με μοναδική πρώτη ύλη την κοπριά δεν είναι αποδοτική και βιώσιμη, ως εκ τούτου εξαρτάται από την συγχώνευση με άλλου τύπου πρώτες ύλες υψηλής απόδοσης σε μεθάνιο. Όποτε η στερεή και υγρή κοπριά συχνά συγχωνεύεται με οργανικά απόβλητα από την αγροτοβιομηχανία, οργανικά οικιακά απόβλητα, ενεργειακές καλλιέργειες ή λυματολάσπη. Η αναερόβια χώνευση κοπριάς και οργανικών σταθεροποιεί την χώνευση, εν μέρει λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ενεργής βιομάζας που θεωρείται πιο ανθεκτική στις ανασταλτικές ενώσεις και εν μέρει λόγω της παρουσίας ανόργανων υλικών όπως ο άργιλος και ο σίδηρος που θεωρείται ότι αντισταθμίζουν τις ανασταλτικές επιδράσεις της αμμωνίας και του αντίστοιχου σουλφιδίου (Angelidaki, 2002).

Υπολείμματα φυτικών καλλιεργειών

Η κατηγορία των υπολειμμάτων φυτικών καλλιεργειών περιλαμβάνει διάφορα γεωργικά υποπροϊόντα λαχανικών και υπολείμματα συγκομιδής, φυτά και μέρη φυτών, χαμηλής ποιότητας ή αλλοιωμένες καλλιέργειες , φρούτα, λαχανικά και αλλοιωμένα ενσιρώματα.

Συνήθως χωνεύονται ως υποστρώματα με ζωική κοπριά και άλλους τύπους πρώτων υλών. Οι περισσότερες από αυτές πρέπει να υποβληθούν σε προεπεξεργασία πριν από την τροφοδοσία τους στον χωνευτή. Οι μέθοδοι προεπεξεργασίας κυμαίνονται από την απλή μείωση του μεγέθους των σωματιδίων έως τις πιο πολύπλοκες μεθόδους που αποσκοπούν στη διάσπαση των λιγνοκυτταρινικών μορίων προκειμένου να διευκολυνθεί η πρόσβαση των αναερόβιων μικροοργανισμών σε αυτές τις δομές.

Ενεργειακές καλλιέργειες

Πολλές ποικιλίες καλλιεργειών όπως αραβόσιτος, διάφορα χόρτα, διάφορα δημητριακά, τεύτλα, πατάτες και ηλίανθοι, τόσο ολόκληρων φυτών όσο και μερών φυτών, έχουν δοκιμαστεί και αποδειχθεί ότι είναι κατάλληλες ως πρώτη ύλη βιοαερίου. Ακόμη, ορισμένες πρόσφατα εισαγόμενες ενεργειακές καλλιέργειες στην Κεντρική Ευρώπη περιλαμβάνουν το *Silphium perfoliatum*, το *Sorghum bicolor*, το *Sorghum Sudanese* και το *Helianthus tuberosus*. Στον Πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι καλλιέργειες και η απόδοση τους σε μεθάνιο.

Energy crop	Methane yield (m ³ /VS)
Maize (whole crop)	205–450
Grass	298–467
Clover grass	290–390
Hemp	355–409
Sunflower	154–400
Oilseed rape	240–340
Potatoes	275–400
Sugar beet	236–381
Fodder beet	420–500
Barley	353–658
Triticale	337–555
Alfalfa	340–500
Ryegrass	390–410
Nettle	120–420
Straw	242–324
Leaves	417–453

Source: Data compilation after Murphy *et al.* (2011).

Πίνακας 1

Murphy et al, 2011, ανέφεραν ότι η σύνθεση των καλλιεργειών και η καταλληλότητά τους ως πρώτης ύλης στην αναερόβια χώνευση ποικίλλει ανάλογα με το στάδιο ωριμότητας. Γενικά, η κυτταρινική περιεκτικότητα αυξάνεται με την ωριμότητα, επηρεάζοντας αρνητικά την χώνευση και την απόδοση σε μεθάνιο της καλλιέργειας. Από την άλλη πλευρά, λιγότερο ώριμες καλλιέργειες, έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία, καθιστώντας δύσκολη την αποθήκευσή τους.

Αν και ορισμένες καλλιέργειες όπως τα τεύτλα είναι εξαιρετική πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοαερίου. Γενικά, η καλλιέργεια ενεργειακών καλλιεργειών απαιτεί την χρήση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και ενέργειας για τη συγκομιδή και τη μεταφορά. Αυτό μειώνει σημαντικά την περιβαλλοντική βιωσιμότητα της χρήσης τους για το βιοαέριο και την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας γενικά.

2.2.2. Βιομάζα από τον βιομηχανικό τομέα

Οι βιομηχανίες που σχετίζονται με την παραγωγή βιομάζας από υποπροϊόντα, υπολείμματα και απόβλητα, είναι συνήθως βιομηχανίες οι οποίες επεξεργάζονται ως πρώτη ύλη γεωργικά προϊόντα όπως βιομηχανίες τροφίμων και ποτών, ζωοτροφών, μεταποίησης ιχθύων, γάλακτος, άμυλου, ζάχαρης, φαρμακευτικών προϊόντων, βιοχημικών και καλλυντικών, χαρτοπολτού και χαρτιού, καθώς και τα σφαγεία. Τα απόβλητα αυτών των βιομηχανιών είναι ποικίλα και έχουν διαφορετικές δυνατότητες ως προς την παραγωγή μεθανίου, του περιεχομένου της ξηράς ουσίας, των δομών και των συνθέσεων, ανάλογα με την προέλευσή τους. Κοινή ιδιότητα των περισσοτέρων από αυτά είναι ότι είναι το γεγονός ότι είναι ομοιογενή, εύπεπτα και πλούσια σε λιπίδια, πρωτεΐνες ή σάκχαρα.

Πολλά βιομηχανικά απόβλητα χρησιμοποιούνται ως «ενισχυτές μεθανίου», λόγω του εξαιρετικά υψηλού δυναμικού τους στην παραγωγή μεθανίου. Επίσης τα βιομηχανικά οργανικά απόβλητα μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία αναερόβιας χώνευσης ως πρόσθετες πρώτες ύλες σε μικρότερες αποκεντρωμένες μονάδες παραγωγής βιοαερίου, σε μεγάλες βιομηχανικές μονάδες παραγωγής (π.χ. βιολογικά βιομηχανικά λύματα). Στην περίπτωση των αποβλήτων με βιολογικά φορτία, ο στόχος είναι να μειωθεί το οργανικό φορτίο και να καταστούν κατάλληλα για περαιτέρω διάθεση και χρήση του παραγόμενου βιοαερίου για την παραγωγή ενέργειας.

Περιπτώσεις συγχώνευσης των βιομηχανικών αποβλήτων είναι με ζωική κοπριά, όπου και το στερεό προϊόν της αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιείται ως εδαφοβελτιωτικό. Επίσης η συγχώνευση βιομηχανικών αποβλήτων έχει θετικά αποτελέσματα όσον αφορά στην οικονομική βιωσιμότητα μιας μονάδας παραγωγής βιοαερίου, λόγω των υψηλότερων αποδόσεων μεθανίου και της αυξημένης σταθερότητας της διαδικασίας.

Ο βασικός περιορισμός για την αναερόβια χώνευση των βιομηχανικών αποβλήτων σχετίζεται με την ενδεχόμενη περιεκτικότητά τους σε βιολογικούς, φυσικούς ή και χημικούς ρύπους όπως φυσικές ακαθαρσίες, παθογόνους μικροοργανισμούς, βαρέα μέταλλα ή ανθεκτικές οργανικές ενώσεις, σε ποσότητες που θα μπορούσαν

να καταστούν πηγές ρύπανσης του περιβάλλοντος ή να δημιουργήσουν κινδύνους για την υγεία των ανθρώπων και των ζώων όταν το παραγόμενο προϊόν της αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό.

2.2.3. Βιομάζα αστικών αποβλήτων

Οργανικά οικιακά απόβλητα

Ο καλός διαχωρισμός των οργανικών οικιακών αποβλήτων προσφέρει καθαρή και υψηλής ποιότητας πρώτη ύλη για αναερόβια χώνευση ενώ ταυτόχρονα μειώνει το ρεύμα των οργανικών αποβλήτων που θα κατέληγε σε χώρους υγειονομικής ταφής ή προς καύση (Favoino, 2002; Rutz et al., 2011), ενισχύει την ανακύκλωση και την ανάκτηση θρεπτικών. Για την επιτυχία της χώνευσης και της παραγωγής υψηλής ποιότητας ακίνδυνου στερεού υπολείμματος, η καθαρότητα του οργανικού υλικού πρέπει να είναι σε υψηλό βαθμό και το ποσοστό των ξένων υλών δεν πρέπει να ξεπερνάει το 0,1%.

Επίσης, τα οργανικά οικιακά απόβλητα έχουν υψηλή βιοδιασπασιμότητα και απόδοση μεθανίου διότι η περιεκτικότητά τους σε θρεπτικά συστατικά είναι καλά ισορροπημένη και ευνοεί τον μεταβολισμό των αναερόβιων μικροοργανισμών (Zhang et al., 2006). Καθώς όμως τα οικιακά απόβλητα περιέχουν διάφορους παθογόνους μικροοργανισμούς, μύκητες κ.α., απαιτείται απολύμανση για την αποτελεσματική απενεργοποίηση της παθογόνου ύλης.

Λυματολάσπη

Διαδεδομένη και συνηθισμένη, ανά τον κόσμο, μέθοδος επεξεργασίας της ιλύος που προκύπτει από την πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία των υγρών αποβλήτων είναι η αναερόβια χώνευση. Η λυματολάσπη έχει υψηλή απόδοση στην παραγωγή μεθανίου η οποία ενισχύεται από διάφορες προκαταρκτικές επεξεργασίες μηχανική αποσύνθεση, χημικές υδρολύσεις, θερμικές υδρολύσεις και ενζυματική αποικοδόμηση (Rulkens, 2008).

Ο περιοριστικός παράγοντας είναι το υψηλό ρυπαντικό φορτίο της λυματολάσπης, που μεταφέρεται μετά την αναερόβια χώνευση στην χωνευμένη ιλύ η οποία είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό. Σε ορισμένες χώρες η χρήση της ιλύος ως λίπασμα απαγορεύεται ενώ σε άλλες επιτρέπεται με πολύ αυστηρά όρια στις επιβλαβείς ουσίες.

Τέλος η λυματολάσπη συχνά συγχωνεύεται με κοπριά ή / και οργανικά απόβλητα από βιομηχανίες και νοικοκυριά, γεγονός που βελτιώνει την απόδοση του βιοαερίου και τη σταθερότητα της διαδικασίας (Kuglarz and Mrovniec, 2009).

2.2.4. Υδάτινη βιομάζα

Η υδάτινη βιομάζα των υδατινών σωμάτων είναι πολλά υποσχόμενη και ανερχόμενη ως πρώτη ύλη για βιοκαύσιμα, συμπεριλαμβανομένου και του βιοαερίου (Burton, 2009; Wellinger, 2009; Angelidaki et al., 2011). Υπάρχουν δύο είδη μακροάλη που παρουσιάζουν ενδιαφέρον όσον αφορά την παραγωγή βιοαερίου. Το πρώτο είναι τα μακροάλη, συνήθως αναφερόμενο ως φύκια, τα οποία είναι πλούσια σε φυσικά σάκχαρα και άλλους υδατάνθρακες, είναι γνωστά για τις υψηλές αποδόσεις βιομάζας και έχουν σημαντικό ρόλο στην στήριξη της υδατικής βιοποικιλότητας. Η δεύτερη ομάδα είναι τα μικροφύκη - μια ετερογενής ομάδα μικροσκοπικών φωτοσυνθετικών οργανισμών, κυρίως μονοκύτταρων, που ζουν σε θαλάσσια ή γλυκά νερά. Τα πράσινα μικροφύκη, γνωστά ως διάτομα, θεωρούνται τα πλέον κατάλληλα για την παραγωγή ενέργειας και βιοαερίου και άλλων βιοκαυσίμων, καθώς και για την παραγωγή υλικών υψηλής αξίας. Τα μικροφύκη έχουν υψηλή φωτοσυνθετική αποτελεσματικότητα και είναι πλούσια σε λιπίδια. Ένας από τους περιορισμούς των μικροφυκών είναι η πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε ξηρή ουσία. Η χρήση των άλγων για την παραγωγή βιοαερίου και ενέργειας είναι ανερχόμενος τομέας με έντονη ερευνητική δράση, ενώ έχουν γίνει και μερικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας για την χρήση της υδατινής βιομάζας ως πρώτη ύλη σε αναερόβιο χωνευτήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : Μέθοδοι ενεργειακής αξιοποίησης του βιοαερίου

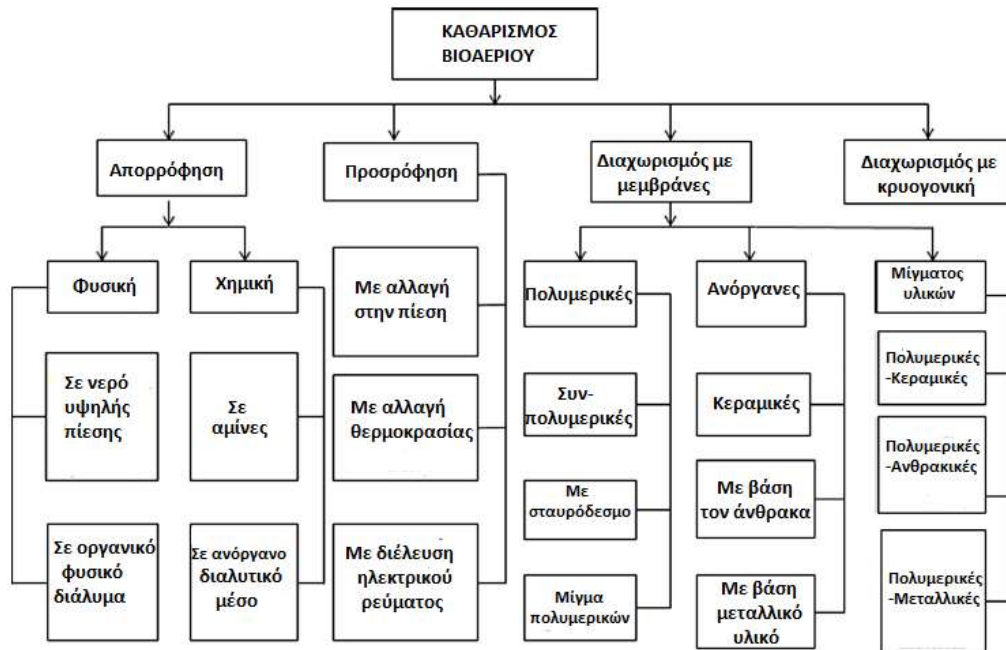
Εισαγωγή

Τα πλεονεκτήματα του βιοαερίου ως καθαρό καύσιμο είναι γνωστά από τον δέκατο ένατο αιώνα, αλλά η μεγάλη αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για την συλλογή του βιοαερίου και κατά συνέπεια και του μεθανίου οφείλεται στο ταχύτατα αναπτυσσόμενο φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Ανθρωπογενή αίτια, τα οποία απελευθερώνουν άμεσα ή έμμεσα μεθάνιο στην ατμόσφαιρα, ευθύνονται για το ένα τρίτο της συνολικής υπερθέρμανσης που συμβαίνει επί του παρόντος. Ως εκ τούτου, η δέσμευση του μεθανίου έχει διπλό πλεονέκτημα αφού παράγει ενέργεια ενώ ταυτόχρονα περιορίζεται το περιβαλλοντικό πρόβλημα της υπερθέρμανσης του πλανήτη (Abbas et al., 2012). Το κεφάλαιο τρίτο που ακολουθεί αποτελείται από δύο ενότητες. Στην πρώτη ενότητα αναλύονται οι τεχνολογίες καθαρισμού και αναβάθμισης του βιοαερίου, έτσι ώστε να γίνει αξιοποιήσιμο και στην δεύτερη υποενότητα περιγράφονται οι τρόποι αξιοποίησης του βιοαερίου.

3.1. Τεχνολογίες αναβάθμισης και καθαρισμού του βιοαερίου

Τόσο από τους χωνευτές όσο και από τους ΧΥΤΑ παράγεται ακατέργαστο βιοαέριο, το οποίο για την περαιτέρω αξιοποίηση του θα υποστεί είτε καθαρισμό ή αναβάθμιση. Το αναβαθμισμένο βιοαέριο ονομάζεται βιομεθάνιο και συνήθως αποτελείται από ~ 97% CH₄ και ~ 3% CO₂ και ουσιαστικά μετατρέπεται κατά τα πρότυπα του φυσικού αερίου, μέσω της απομάκρυνσης του CO₂ (αναβάθμιση) και άλλων ακαθαρσιών (καθαρισμός). Στόχος της αναβάθμισης του παραγόμενου βιοαερίου είναι η απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) το οποίο μειώνει την θερμογόνο δύναμη του μεθανίου (CH₄). Οι τεχνολογίες που αναπτύσσονται επί του παρόντος και είναι διαθέσιμες σε βιομηχανική κλίμακα για την αναβάθμιση του βιοαερίου περιλαμβάνουν την προσρόφηση, την απορρόφηση (φυσική και χημική), τον διαχωρισμό με μεμβράνες και την κρυογονική (Εικόνα). Αυτές οι τεχνολογίες χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για τον διαχωρισμό του

CO₂ ενώ απαιτείται και το στάδιο καθαρισμού πριν από την αναβάθμιση για να μειωθούν οι υψηλές συγκεντρώσεις ακαθαρσιών όπως H₂O, H₂S, NH₃, οι σιλοξάνες (Khan et al, 20117).



Εικόνα 2: Σύγχρονες τεχνολογίες αναβάθμισης του βιοαερίου. (Τροποποίηση από: Khan et al., 2017)

3.1.1. Προσρόφηση

Η διαδικασία της προσρόφησης περιλαμβάνει την μεταφορά της διαλυμένης ουσίας από το ρεύμα βιοαερίου σε προσροφητικά υλικά, λόγω φυσικών ή Van der Waals δυνάμεων. Το προσροφητικό υλικό θα πρέπει να έχει τις ακόλουθες ιδιότητες: α) η επιφάνεια του να έχει βασικό χαρακτήρα έτσι ώστε να ελκύει το διοξείδιο του άνθρακα. β) Οι πόροι του προσροφητικού υλικού να είναι κατάλληλης διαμέτρου έτσι ώστε να μπορεί να εισχωρεί στην δομή του το CO₂ και όχι το CH₄. γ) Η αναγέννηση του προσροφητικού υλικού και η εκρόφηση του CO₂ να είναι διαδικασίες χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και δ) Θα πρέπει να έχει καλή

ικανότητα απομάκρυνσης της υγρασίας. Τα πιο διαδεδομένα προσροφητικά υλικά είναι ο ενεργός άνθρακας και οι ζεόλιθοι. Με μια σωστή επιλογή προσροφητικού, η διαδικασία μπορεί να απομακρύνει το CO₂, H₂S, την υγρασία και άλλες ακαθαρσίες από το βιοαέριο είτε επιλεκτικά είτε ταυτόχρονα. Στην προσρόφηση μεταβλητής πίεσης (Pressure Swing Adsorption, PSA) τα μη επιθυμητά αέρια όπως το CO₂ διαχωρίζονται από το βιοαέριο υπό υψηλή πίεση, ενώ το η εκρόφηση των απορροφημένων ουσιών γίνεται μειώνοντας την πίεση. Το H₂S έχει ήδη απομακρυνθεί από το βιοαέριο διότι έχει τοξικό χαρακτήρα για την προσρόφηση. Η συγκέντρωση του μεθανίου στο τελικό αέριο ρεύμα μπορεί να φτάσει το 95-99%. Άλλες μέθοδοι εκρόφησης είναι αυτές της μεταβλητής θερμοκρασίας (Temperature swing adsorption, TSA) υπό σταθερή πίεση σε κατάλληλους προσροφητές όπως οι μικροσφαίρες κρυσταλλίνης άνθρακα (CCM) και οι μικροσφαίρες ανθρακικού xerogel (CXM) και της διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου του προσροφητή παράγεται θερμότητα μέσω του φαινομένου Joule. Και στις δύο μεθόδους η αύξηση της θερμοκρασίας βοηθάει στην απελευθέρωση του CO₂ από τον προσροφητή (Khan et al, 2017)

3.1.2 Απορρόφηση

Η απορρόφηση είναι διεργασία η οποία βασίζεται στην διαλυτότητα των ανεπιθύμητων, προς απομάκρυνση συστατικών του βιοαερίου. Το πρωτογενές βιοαέριο ρέει διαμέσου υγρής στήλης με πληρωτικό υλικό. Το CO₂ έχει μεγαλύτερη διαλυτότητα σε σύγκριση με το μεθάνιο, οπότε το αέριο που εξέρχεται από την στήλη έχει υψηλή συγκέντρωση μεθανίου ενώ το υγρό υψηλή συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (Cozma and Ghinea, 2013).

Υπάρχουν δύο τύποι απορρόφησης η φυσική και η χημική. Η φυσική απορρόφηση μπορεί να γίνει είτε με χρήση νερού υψηλής πίεσης (High pressure water scrubbing, HPWS) ή με οργανικό φυσικό καθαρισμό (Organic physical scrubbing, OPS). Ενώ ο καθαρισμός του βιοαερίου με αμίνες (amine scrubbing, AS) ή ανόργανους διαλύτες (inorganic solvent scrubbing, ISS) ανήκει στους τύπους χημικής απορρόφησης (Chen et al, 2015).

Ο καθαρισμός με νερό υψηλής πίεσης (HPWS) είναι η πιο συνηθισμένη και καθιερωμένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του CO₂ και του H₂S από το βιοαέριο, δεδομένου ότι αυτά τα αέρια είναι πιο διαλυτά σε H₂O από το CH₄. Η πίεση λειτουργίας του HPWS είναι 10 bar (Cozma, 2014). Αν και είναι μια φιλική προς το περιβάλλον και εξαιρετικά αποδοτική διαδικασία χωρίς ειδικές απαιτήσεις χημικών ουσιών και με υψηλή ανάκτηση μεθανίου (> 97%), έχει υψηλό λειτουργικό και επενδυτικό κόστος. Επιπλέον, απαιτείται υψηλή κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαδικασία αναζωογόνησης του νερού, γεγονός που οδηγεί σε επίσης σε υψηλό κόστος (Eze and Agbo, 2010). Αντί νερού είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν οργανικοί διαλύτες, όπως μεθανόλη (CH₃OH), N-μεθυλοπυρρολιδίνη (NMP) και αιθέρες πολυαιθυλενογλυκόλης (PEG). Η διαλυτότητα του CO₂ είναι πενταπλάσια σε διάλυμα αιθέρων PEG από ό, τι στο νερό προσφέροντας το ίδιο ποσοστό αναβάθμισης του βιοαερίου σε μικρότερη ποσότητα διαλύτη. Εκτός από το CO₂ απορροφάται ικανοποιητικά και το H₂S, καθώς και άλλες ενώσεις όπως H₂S, H₂O, O₂, N₂, και αλογονωμένοι υδρογονάνθρακες. Παρόλο που ο καθαρισμός με οργανικούς διαλύτες είναι αποδοτικότερος συγκριτικά με του νερού όσον αφορά τον διαχωρισμό του CO₂, απαιτείται περισσότερη ενέργεια για την αναγέννηση του διαλύτη. Επίσης, το κόστος των οργανικών διαλυτών είναι σημαντικά υψηλότερο από το κόστος για το νερό (Tock et al., 2010).

Τέλος, η χημική απορρόφηση περιλαμβάνει την αναστρέψιμη αντίδραση μεταξύ των απορροφημένων ουσιών και του διαλύτη. Οι πιο συνηθισμένες αμίνες που χρησιμοποιούνται ως διαλύτες για την απομάκρυνση των όξινων αερίων (CO₂ και H₂S) είναι η διαιθανολαμίνη (DEA), η μονοαιθανολαμίνη (MEA) και η μεθυλ-διαιθανολαμίνη (MDEA) (Chen, 2015). Σήμερα, ένα μίγμα από MDEA και πιπεραζίνη (PZ), που ονομάζεται ενεργοποιημένο MDEA (AMDEA), χρησιμοποιείται συνήθως σε αυτή τη διαδικασία διότι προσφέρει υψηλό ρυθμό αντίδρασης για την απορρόφηση του CO₂. Η απομάκρυνση του CO₂ από το διάλυμα αμινών και η αναγέννηση του πραγματοποιείται με τον βρασμό του διαλύματος. Το ποσοστό του μεθανίου είναι >99% στο τελικό αέριο. Η διαδικασία έχει χαμηλό λειτουργικό αλλά υψηλό επενδυτικό κόστος και κόστος για την θέρμανση και την αναγέννηση του

διαλύματος αμινών. Η απομάκρυνση του H₂S είναι δυνατή αλλά αυξάνει επειπλέον το κόστος αναγέννησης του διαλύματος και είναι προτιμητέο να γίνεται σε προηγούμενο στάδιο. Άλλο μειονέκτημα της χρήσης διαλυμάτων αμινών είναι η διαχείριση των χημικών αποβλήτων, η διάβρωση και η συσσώρευση ρύπων, γεγονός που καθιστά τη διαδικασία πιο περίπλοκη (Palma, 2013). Επίσης, για την απομάκρυνση του CO₂ από το βιοαέριο χρησιμοποιούνται και ανόργανοι διαλύτες όπως: υδατικά διαλύματα αλκαλικών αλάτων όπως υδροξείδια νατρίου, καλίου, αμμωνίου και ασβεστίου (Huang, 2002).

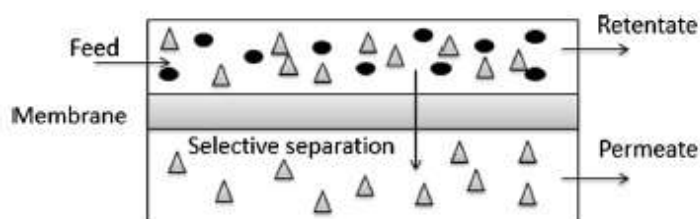
3.1.3. Διαχωρισμός με μεμβράνες

Η μεμβράνη δρα ως διαπερατό φράγμα που επιτρέπει σε συγκεκριμένες ενώσεις να διέρχονται. Ο έλεγχος της διαπερατότητας τους γίνεται με βάση τις εφαρμοζόμενες κινητήριες δυνάμεις όπως η διαφορά συγκέντρωσης, την πίεσης, τη θερμοκρασίας και ηλεκτρικών φορτίων μεταξύ διαφορετικών ενώσεων. Γενικά, χρησιμοποιούνται δύο μοντέλα για να εξηγήσουν τη διαδικασία διαχωρισμού μεμβρανών, το μοντέλο διάχυσης και το μοντέλο ροής πόρων (Jiang et al., 2006).

Για την αναβάθμιση του βιοαερίου, το CO₂ διαπερνά την μεμβράνη ενώ το CH₄ παραμένει στο ρεύμα εισόδου ως κατακράτημα. Ο διαχωρισμός μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικός εάν η ροή του αερίου είναι χαμηλή και η περιεκτικότητα του διοξειδίου του άνθρακα στην είσοδο είναι υψηλή. Αυτές οι εκτιμήσεις είναι κατάλληλες για μια τυπική μονάδα αναβάθμισης του βιοαερίου (Baker and Lokhandwala, 2008). Πριν την εισαγωγή του βιοαερίου στις μεμβράνες είναι απαραίτητη η απομακρυνση του H₂S καθώς και του νερό, των σταγονιδίων ελαίου και των αερολυμάτων. (Khan et al, 2017)

Οι μεμβράνες για το καθαρισμό του βιοαερίου μπορεί να είναι πολυμερικές, ανόργανες ή μεικτές μεμβράνες καθαρισμό βιοαερίου. Οι πιο συνηθισμένες πολυμερικές μεμβράνες που χρησιμοποιούνται για την αναβάθμιση του βιοαερίου είναι οι πολυϊμιδίου (PI) και οξικής κυτταρίνης (CA). Συγκεκριμένα οι πολυμερικές μεμβράνες οξικής κυτταρίνης ήταν οι πρώτες που διατέθηκαν στο εμπόριο για τον

καθαρισμό του βιοαερίου και έχουν σχετικά χαμηλή τιμή λόγω της αφθονίας του ανανεώσιμου πόρου κυτταρίνης. Οι ανόργανες μεμβράνες είναι σε πλεονεκτική θέση σε σύγκριση με τις συμβατικές πολυμερικές, καθώς προσφέρουν περισσότερη μηχανική αντοχή, θερμική σταθερότητα και αντίσταση σε οποιαδήποτε χημική ουσία. Ωστόσο και τα δύο είδη παρουσιάζουν μειονεκτήματα, για παράδειγμα ορισμένες πολυμερικές μεμβράνες έχουν υψηλό κόστος, είναι ευαίσθητες στην πλαστικοποίηση και παρουσιάζουν αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ διαπερατότητας και εκλεκτικότητας. Επίσης η ανάπτυξη συνεχών ανόργανων μεμβρανών χωρίς ελαττώματα είναι μια αυστηρή διαδικασία και απαιτεί συνεχή παρακολούθηση λόγω της εύθραυστης δομής τους. Λόγω των περιορισμών αυτών η έρευνα έχει προσανατολιστεί στην ανάπτυξη υβριδικών τύπων μεμβρανών συνδυάζοντας πολυμερικά και ανόργανα υλικά (Khan et al. 2017) Τέλος, Chen et al. (Chen et al) εντόπισαν ότι η ανάκτηση του CH₄ θα μπορούσε να βελτιωθεί από το 80% στο 99,5% χρησιμοποιώντας σύστημα μεμβρανών.



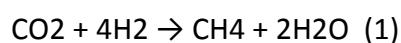
3.1.4. Κρυογονικός διαχωρισμός

Ο κρυογονικός διαχωρισμός του βιοαερίου βασίζεται στην αρχή ότι κάθε αέριο όπως το CO₂ και το H₂S υγροποιείται υπό διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα κάτω από συνθήκες πολύ χαμηλής θερμοκρασίας (-170 ° C) και υψηλής πίεσης (80 bar). Το σημείο ζέσεως του CH₄ σε 1 ατμόσφαιρα είναι -161,5 ° C που είναι πολύ χαμηλότερο από το σημείο ζέσεως του CO₂ που είναι -78,2 ° C, ως εκ τούτου επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός του CO₂ από το CH₄ με την υγροποίησή του (Andriani and Wresta, 2014). Το κύριο μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας κρυογονικού διαχωρισμού είναι η χρήση ποικίλων συστημάτων επεξεργασίας, κυρίως στροβίλων, εναλλακτικών θερμότητας, στηλών

απόσταξης και συμπιεστών που αυξάνουν το επενδυτικό και λειτουργικό κόστος (Hullu et al., 2008) και αυξάνουν τις ενεργειακές ανάγκες (Khan et al. 2017). Η τεχνολογία αυτή είναι υπο ανάπτυξη αν και υπάρχουν ήδη ορισμένες εμπορευματοποιημένες μονάδες σε λειτουργία. Ο κρυογονικός διαχωρισμός μπορεί να είναι χρήσιμος εάν ο στόχος είναι η παραγωγή υγροποιημένου βιομεθανίου (LBM) και υγρού φυσικού αερίου (LNG) (Krich et al., 2015). Συνιστάται να διαχωρίζετε προηγουμένως το H₂O και το H₂S για να αποφεύγεται η έμφραξη του εξοπλισμού λόγω της κατάψυξης του υπάρχοντος νερού στο ακατέργαστο βιοαέριο (Sun et al., 2015).

3.1.5. Καινοτόμος εναλλακτική βιολογική μέθοδος αναβάθμισης

Οι διαθέσιμες τεχνολογίες αναβάθμισης που αναφέρθηκαν παραπάνω έχουν αποδειχθεί αρκετά ενεργοβόρες και κοστοβόρες. Μια καινοτόμος εναλλακτική λύση για την αναβάθμιση του βιοαερίου είναι η βιολογική μέθοδος μέσω της υδρογονοτροφικής μεθανογένεσης η οποία ανοίγει νέες οδούς για μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (Kougiaris et al., 2017). Η αναβάθμιση του βιοαερίου σε βιομεθάνιο πραγματοποιείται με την χημική μετατροπή του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε μεθάνιο (CH₄) σύμφωνα με την αντίδραση Sabatier (1) ενώ το υδρογόνο (H₂) στην αντίδραση λαμβάνεται συνήθως από την ηλεκτρόλυση του νερού (H₂O).

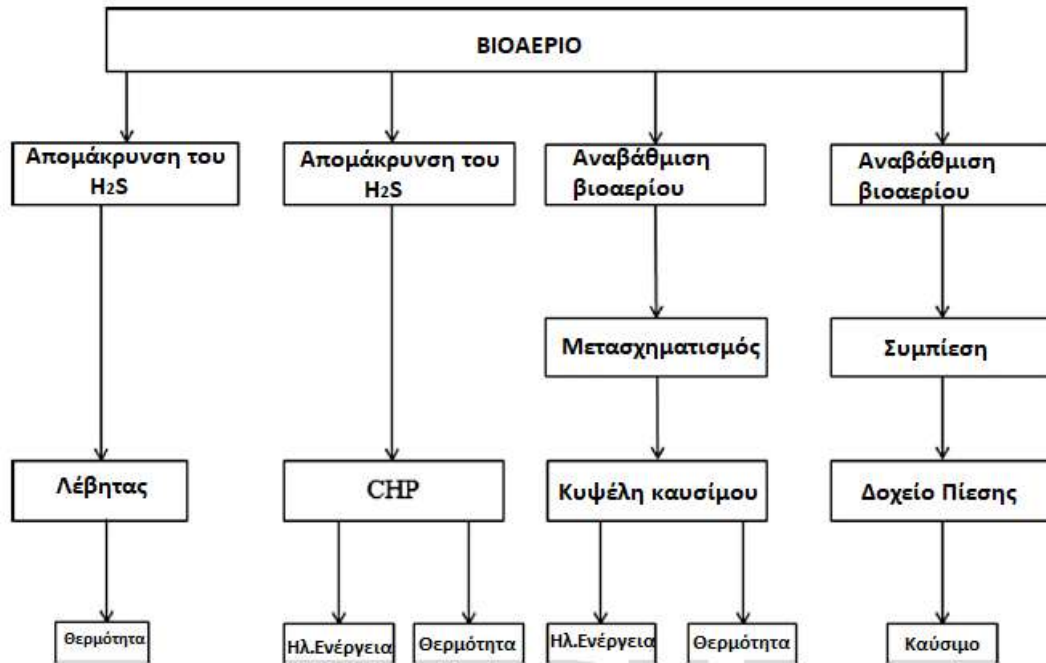


Τα πλεονεκτήματα της βιολογικής αναβάθμισης είναι: Α) η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας Β) το χαμηλό επενδυτικό και λειτουργικό κόστος Γ) το υψηλό ποσοστό μεθανίου στο τελικό αέριο (>98%) Δ) ο θετικός αντίκτυπος στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα. Ωστόσο, αυτή η τεχνολογία θα μπορούσε να είναι η καλύτερη εναλλακτική λύση αναβάθμισης του βιοαερίου εάν η επιθυμητή ηλεκτρική ενέργεια για την παραγωγή του H₂ από την ηλεκτρόλυση του νερού είναι σε πλεόνασμα και το H₂ είναι φθηνότερο. Επομένως, οι περιορισμοί αυτοί πρέπει να αντιμετωπιστούν για να εισαχθεί η εμπορική εφαρμογή του (Khan et al. 2017).

3.2. Επιλογές ενεργειακής αξιοποίησης του βιοαερίου

Ο στόχος που θέτει η οδηγία της ΕΕ για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (2009/28 / ΕΚ) (EUR-Lex, 2009) απαιτεί το 20% της παραγόμενης ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έως το 2020. Έτσι, η διερεύνηση εναλλακτικών, φιλικών προς το περιβάλλον και ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων έχει γίνει το επίκεντρο κυβερνητικών πολιτικών και βιομηχανικής και ακαδημαϊκής έρευνας. Το βιοαέριο είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από την αναερόβια χώνευση βιομάζας (λυματολάσπη, αστικά στερεά απόβλητα, γεωργικά απόβλητα, ενεργειακές καλλιέργειες και κτηνοτροφικά απόβλητα). Το βιοαέριο αποτελείται από περίπου 50-60% μεθάνιο (CH₄), 40-50% διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και μερικά δευτερεύοντα συστατικά, όπως υδρόθειο (H₂S) και νερό. Η χρήση βιοαερίου για την παραγωγή ενέργειας θα μπορούσε να εκτοπίσει ως ένα βαθμό τα ορυκτά καύσιμα, να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να μειώσει την εξάρτηση από την εισαγόμενη ενέργεια (Abdeshahian P et al., 2012)

Οι εμπορικές μέθοδοι αξιοποίησης του βιοαερίου περιλαμβάνουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας μέσω μονάδων συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (CHP), την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου και τη μετατροπή σε μηχανική ενέργεια μέσω κινητήρων εσωτερικής καύσης, για τον τομέα των μεταφορών (ICEs). Το βιομεθάνιο μπορεί να εγχυθεί στο δίκτυο αερίου ή / και να μετατραπεί σε συμπιεσμένο ανανεώσιμο φυσικό αέριο (CNG) ή σε υγροποιημένο ανανεώσιμο φυσικό αέριο (LNG) για να χρησιμεύσει ως καύσιμο μεταφοράς. Το βιοαέριο μπορεί επίσης να μετασχηματιστεί σε σύνθετο αέριο (CO και H₂) για παραγωγή υγρών καυσίμων μέσω σύνθεσης Fischer Tropsch (FT) (Jahangiri H, et al. 2014). Γενικά, το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας, συνδυασμένης θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (CHP) ή ως καύσιμο οχημάτων.



Εικόνα 3: Σύγχρονες τεχνολογίες αξιοποίησης του βιοαερίου. (Τροποποίηση από: Khan et al., 2017)

Στη Σουηδία, στις νέες μονάδες βιοαερίου μεγάλης κλίμακας κυριαρχεί η χρήση του βιοαερίου για την παραγωγή καυσίμου οχημάτων (Lantz, 2012). Ενώ στη Γερμανία, ο συνηθέστερος τρόπος εκμετάλλευσης του βιοαερίου είναι η συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (CHP). Άλλες τεχνολογίες για τη αξιοποίηση του βιοαερίου, όπως η αναβάθμισή του, δεν επιλέγονται από σημαντική μερίδα των εγκαταστάσεων βιοαερίου (Djatkov et al., 2014). Μέχρι σήμερα, η κυρίαρχη τελική χρήση του βιοαερίου ήταν η επιτόπου καύση του σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, για τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Σε σύγκριση με την CHP βιοαερίου, η αναβάθμιση του βιοαερίου για την παραγωγή βιομεθανίου αποτελεί μια «ανώριμη» αλλά πολλά υποσχόμενη τεχνολογία αξιοποίησης του βιοαερίου (Ravina και Genon, 2015). Μια άλλη υποσχόμενη τεχνολογία αξιοποίησης του βιοαερίου είναι η τροφοδότηση κυψελών στερεού οξειδίου (SOFCs) λόγω της υψηλότερης ηλεκτρικής απόδοσης και της μεγαλύτερης ανοχής σε ρύπους σε σύγκριση με την παραδοσιακή τεχνολογία CHP βιοαερίου (Trendewicz and Braun, 2013; Wongchanapai et al., 2013).

3.2.1. Χρήση του βιοαερίου προς παραγωγή θερμότητας και ατμού.

Στις περισσότερες αναπτυσσόμενες χώρες, το βιοαέριο χρησιμοποιείται για το μαγείρεμα και το φωτισμό (Grimsby et al. , 2016). Για την θέρμανση χώρων, οι ατμοσφαιρικές συσκευές λαμβάνουν αέρα από το περιβάλλον με φυσική αναρρόφηση. Η αρχική πίεση αερίου των 8 mbar παράγεται από τη μονάδα παραγωγής βιοαερίου (Deublein and Steinhauser,2011). Το βιοαέριο χρησιμοποιείται επίσης ως καύσιμο σε λέβητα για την παραγωγή ατμού σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Η καύση του βιοαερίου σε ένα λέβητα είναι μια από τις αξιόπιστες τεχνολογίες, ακόμα και αν το βιοαέριο χαμηλής ποιότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πίεση περίπου 8-25 mbar. Ωστόσο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το επίπεδο H₂S της τάξεως κάτω των 1000 ppm, για να αποφευχθεί η διάβρωση του λέβητα (Sun et al., 2015).

Οι λέβητες θέρμανσης μπορούν να εξοπλίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το βιοαέριο να τροφοδοτείται συνδυαστικά και με άλλα καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, υγρό αέριο). Αυτό επιτρέπει να γίνεται χρήση του βιοαερίου το οποίο δεν χρειάζεται για την CHP εκείνη τη χρονική στιγμή, και διαφορετικά θα έπρεπε να καεί και συνεπώς να χαθεί (Deublein and Steinhauser,2011).

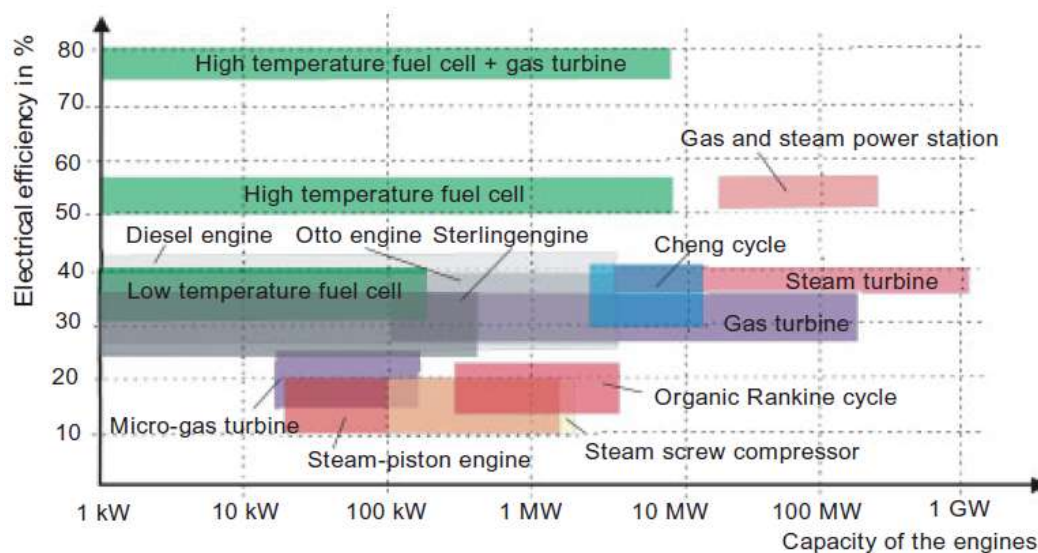
Ακόμη, με βάση τις ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση τόσο των αναερόβιων χωνευτών αλλά και των συστημάτων αποστείρωσης των τροφικών υπολειμμάτων και των αποβλήτων σφαγείων, αποδεικνύεται ότι περίπου το 50% της παραγόμενης θερμότητας διατίθεται για τις διαδικασίες των εγκαταστάσεων συμπεριλαμβανομένων των εσωτερικών απωλειών και το υπόλοιπο είναι διαθέσιμο για εξωτερική χρήση (European Commission, 2002).

3.2.2. Χρήση του βιοαερίου για την παραγωγή ρεύματος και θερμότητας

Το βιοαέριο αποτελεί οικονομικό καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (Beaudin et al., 2014). Στις εγκαταστάσεις συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (CHP) χρησιμοποιούνται τετράχρονοι κινητήρες ή πετρελαιοκινητήρες, κινητήρες Stirling, αεριοστροβίλοι,

μικρο-αεριοστρόβιλοι, κυψέλες καυσίμου υψηλής ή χαμηλής θερμοκρασίας και συνδυασμός κυψέλης καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας με αεριοστρόβιλο (Deublein and Steinhauser,2011). Οι κινητήρες βιοαερίου δεν απαιτούν αέριο υψηλής ποιότητας, αλλά προτιμάται η συμπύκνωση των ατμών του νερού στο ακατέργαστο αέριο για να αποφευχθεί η συμπύκνωση στους αγωγούς αερίου. Το απαιτούμενο επίπεδο H₂S είναι μικρότερο από 250 ppm για να αποφευχθεί η διάβρωση του λέβητα και του αερίου σε συνδυασμένες μονάδες θερμότητας και ηλεκτρισμού (CHP) (Holm-Nielsen and Al Seadi, 2010).

Το βιοαέριο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την παραγωγή ατμού μέσω του οποίου ένας κινητήρας τίθεται σε κίνηση όπως για παράδειγμα, στον οργανικό κύκλο Rankine (ORC), στον κύκλο Cheng, στον ατμοστρόβιλο και στην ατμομηχανή. Στη Εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το φάσμα δυνατοτήτων για τις γεννήτριες ισχύος που διατίθενται στο εμπόριο ως δοιμαστικές μονάδες ή σε βιομηχανική κλίμακα. Η αποτελεσματικότητα υποδεικνύει την αναλογία της ηλεκτρικής ενέργειας ως προς το συνολικό ενεργειακό περιεχόμενο του βιοαερίου. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι οι κινητήρες μικρής χωρητικότητας έχουν χαμηλότερες αποδόσεις από τους κινητήρες μεγάλου δυναμικού.



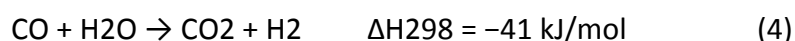
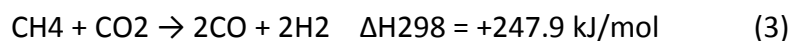
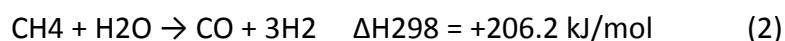
Εικόνα 4: Πηγή: (Deublein and Steinhauser,2011).

Το παραγόμενο ρεύμα και η θερμότητα είναι δυνατόν να τροφοδοτήσουν τον ίδιο τον βιοαντιδραστήρα, τα παρακείμενα κτίρια και τις γειτονικές βιομηχανικές εταιρείες ή οικίες. Επίσης η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να τροφοδοτήσει το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και η θερμότητα το δίκτυο για την παροχή θερμότητας σε μεγάλες αποστάσεις (Deublein and Steinhauser,2011).

3.2.3. Παραγωγή H₂ από το βιοαέριο

Η χρήση βιοαερίου αντί του μεθανίου CH₄ για την παραγωγή H₂ μέσω καταλυτικής διεργασίας του μίγματος CH₄ – CO₂, αποτελεί επίσης έναν πολλά υποσχόμενο τρόπο για τη μείωση των εκπομπών CO₂ (Muradon, 2008). Επί του παρόντος, το H₂ που παράγεται από το βιοαέριο χρησιμοποιείται στις κυψέλες καυσίμων υδρογόνου, τεχνολογία η οποία μετατρέπει αποτελεσματικά το H₂ σε ηλεκτρική ενέργεια σε εμπορικό επίπεδο. Η παρουσία του H₂S είναι δηλητηριώδης για τον καταλύτη νικελίου (Ni), οπότε πρέπει να αφαιρεθεί πριν από τη διαδικασία αναμόρφωσης.

Σημαντικό μειονέκτημα της διαδικασίας είναι ο σχηματισμός μονοξειδίου του άνθρακα (CO) ως αέριου παραπροϊόντος (Effendi et al., 2005) το οποίο λειτουργεί ως δηλητήριο για την κυψέλη καυσίμου στην περιοχή των 50 ppm. Οικονομική και εφικτή λύση για την μείωση του CO αποτελεί η ελεγχόμενη αναμόρφωση του βιοαερίου (εξισώσεις (2) και (3)) και οι αντιδράσεις μετατόπισης του CO (εξίσωση (4))



Τα πλεονεκτήματα της χρήσης βιοαερίου για την παραγωγή H₂: α) Είναι η αξιοποίηση ενός εγχώριου και τοπικού ενεργειακού πόρου β) το βιοαέριο αποτελεί

φτηνό καύσιμο που βοηθά στη μείωση του τελικού κόστους χρήσης. γ) Θεωρείται διαδικασία φιλική προς το περιβάλλον (Khan et al., 2017).

3.2.4. Εισαγωγή του βιοαερίου στο δίκτυο του φυσικού αερίου

Η αξιοποίηση του βιοαερίου ως υποκατάστατο του φυσικού αερίου έχει αποκτήσει ιδιαίτερη περιβαλλοντική σημασία τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της εξάντλησης και της χαμηλής ποιότητας πόρων φυσικού αερίου. Για την εισαγωγή του παραγόμενου βιοαερίου στο δίκτυο του φυσικού αερίου καθίσταται απαραίτητη η αναβάθμιση του σε ποιότητα ισοδύναμη με αυτή του φυσικού αερίου. Πολλές χώρες όπως η Σουηδία, η Γερμανία, η Ελβετία και η Γαλλία έχουν θέσει τα δικά τους πρότυπα για την έγχυση βιοαερίου στα δίκτυα φυσικού αερίου για την αποφυγή της διάβρωσης του εξοπλισμού. Με βάση τα επιτρεπτά όρια που έχουν θέσει οι χώρες για τα συστατικά του βιοαερίου, στον Πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται το εύρος των επιτρεπτών τιμών για κάθε συστατικό.

Συστατικά	Εύρος τιμών
CH ₄ (% vol)	≥ 85 - 96
CO ₂ (% vol)	≤ 2,5 - 6
O ₂ (% vol)	≤ 0,01 - 1
H ₂ (% vol)	≤ 0,5 - 6
CO (% vol)	≤ 1 - 2
H ₂ S (mg/Nm ³)	≤ 5 - 10
Total sulphur (mg/Nm ³)	≤ 10 - 30
NH ₃ (mg/Nm ³)	≤ 0 - 20
H ₂ O (mg/Nm ³)	≤ 3
Water dew point (Σημείο δρόσου) (°C)	≤ (- 8,7) – (-5)
Heavy metals (mg/Nm ³)	≤ 1 - 5
Siloxanes (mg/Nm ³)	≤ 5 - 10
Halogens (mg/Nm ³)	≤ 0 - 2
Mercaptans (mg/Nm ³)	≤ 5 - 15

*Πίνακας 2: Απαιτήσεις βιοαερίου για την έγχυση του σε δίκτυα φυσικού αερίου.
(Πηγή: Hahn et al., 2014; Svensson, 2014)*

3.2.5. Μετετροπή του βιοαερίου σε bio-CNG και η χρήση του ως καύσιμο οχημάτων

Για την μετατροπή του βιοαερίου σε συμπιεσμένο φυσικό αέριο, bio-CNG (Compressed Natural Gas) είναι απαραίτητη η αναβάθμιση του σε $\geq 97\%$ CH₄. Η συμπίεση επιτυγχάνεται υπό πίεση 20-25 MPa (2900-3600 psi). Οι ιδιότητες του bio-CNG είναι οι ίδιες με αυτές του CNG.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: α) η μείωση του όγκο αποθήκευσης β) η υψηλή θερμογόνος δύναμη του bio-CNG (52000 kJ/kg) γ) η παραγωγή υψηλής αξίας προϊόντος. Ενώ το βασικό μειονεκτήμα της μεθόδου είναι το γεγονός ότι η συμπίεση υπό υψηλή πίεση είναι πολύ δαπανηρή, ωστόσο αντισταθμίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα πλεονεκτήματα.

Η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, η ενεργειακή κρίση και το αυξανόμενο κόστος των ορυκτών καυσίμων είναι οι κινητήριες δυνάμεις για την ανάπτυξη εναλλακτικών καυσίμων οχημάτων. Σημαντική εφαρμογή του συμπιεσμένου βιομεθανίου (bio-CNG) είναι η χρήση του ως εναλλακτικό καύσιμο οχημάτων. Στην Σουηδία, το 2015 το 73% του παραγόμενου βιομεθανίου χρησιμοποιούνταν σε CNG οχήματα. Από την σύγκριση τους CNG με το bio-CNG έχουν διαπιστωθεί τα εξής:

A) Οι ιδιότητες του είναι ίδιες με του CNG όσον αφορά την λειτουργία της μηχανής, την κατανάλωση και την απόδοση (Lim et al., 2015)

B) Ο βαθμός εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα είναι στο ίδιο επίπεδο, ωστόσο έχουν παρατηρηθεί ελαφρώς αυξημένες εκπομπές των NO_x, HC και CO για το bio-CNG σε σχέση με το CNG όταν χρησιμοποιείται ως καύσιμο κίνησης (Patterson et al., 2011)

Γ) Επιπλέον, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στην εξοικονόμηση καυσίμου μεταξύ του bio-CNG (24,11 km / kg) και του CNG (24,38 km / kg) (Subramanian et al., 2013).

Δ) Στην περίπτωση βαρέων οχημάτων η χρήση Bio-CNG είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον σε σχέση με άλλα καύσιμα λόγω της μεγάλης υψηλής θερμογόνου δύναμης. Επίσης, υπάρχει μείωση κατά 63% στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου όταν χρησιμοποιείται Bio-CNG αντί για CNG στα βαρέα οχήματα (Uusitalo et al, 2014).

Το Bio-CNG χρησιμοποιείται ευρέως στη Σουηδία, την Ιταλία, τη Γερμανία, την Ελβετία, τη Γαλλία, την Αυστρία, την Ολλανδία και την Αγγλία ως καύσιμο κίνησης. Οι σημαντικότεροι δείκτες ποιότητας βιοαερίου για καύσιμα οχημάτων είναι οι συγκεντρώσεις CH₄ και CO₂, οι οποίες πρέπει να είναι $\geq 96\%$ και $<2,5\%$ αντίστοιχα (Lim et al., 2015). Αυτές οι απαιτήσεις για το βιομεθάνιο μπορούν να θεωρηθούν ως ποιοτικό πρότυπο και για άλλες αναπτυσσόμενες χώρες όπως το Πακιστάν, την Ινδία, την Μαλαισία και την Ινδονησία.

3.2.6. Σύγκριση των μεθόδων αξιοποίησης του βιοαερίου.

Οι Hakawati et al (2017) διεξήγαγαν μελέτη σχετικά με την αποδοτικότερη μέθοδο αξιοποίησης βιοαερίου, αναπτύσσοντας ένα συνεκτικό πλαίσιο για την ανάλυση των τρόπων εκμετάλλευσης του βιοαερίου για την παραγωγή ενέργειας. Η έρευνα αξιολόγησε 49 τρόπους χρησιμοποιώντας μια συνεκτική μέθοδο ανάλυσης κύκλου ζωής, εστιάζοντας στην ενεργειακή απόδοση ως επιλεγμένο κριτήριο. Η έρευνα αυτή είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός ευέλικτου πλαισίου για τη σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης, το οποίο μπορεί να αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση της βιωσιμότητας των συστημάτων αξιοποίησης του βιοαερίου προς παραγωγή ενέργειας. Η μέθοδος αξιολόγησης που αναπτύχθηκε βασίστηκε στην τεχνική LCA (Life cycle assessment) η οποία ορίζεται ως μια τεχνική για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών διαστάσεων και των πιθανών επιπτώσεων που συνδέονται με ένα προϊόν, μια διαδικασία ή υπηρεσία (US EPA, 2006). Το υπό εξέταση σύστημα ορίστηκε έτσι ώστε να περιλαμβάνει το μέρος της διαδικασίας που σχετίζεται με την άμεση χρήση του ακατέργαστου βιοαερίου, καθώς και την παραγωγή ενδιάμεσων καυσίμων (συνθετικό αέριο, βιομεθάνιο) και βοηθητικές διεργασίες όπως η ηλεκτρόλυση. Επίσης στην βασική ανάλυση ελήφθη

υπόψη μόνο η άμεση ενέργεια δηλαδή αυτή που χρησιμοποιείται απευθείας στο σύστημα (για παράδειγμα, ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για την αναβάθμιση). Από το σύστημα μελέτης εξαιρέθηκαν οι ενεργειακές απαιτήσεις για την μεταφορά των καυσίμων, την παραγωγή του υποστρώματος της αναερόβιας χώνευσης και την αναερόβια χώνευσης. Επίσης, δεν συμπεριλήφθηκαν στο σύστημα οι ενεργειακές αποδόσεις των συστημάτων αξιοποίησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας. Οι οριακές συνθήκες των συστημάτων μελέτης ορίστηκαν έτσι ώστε να γίνεται σαφής σύγκριση μόνο μεταξύ των τρόπων αξιοποίησης του βιοαερίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν τα εξής ότι οι ενεργειακές αποδόσεις κυμαίνονταν μεταξύ:

- 8% και 54% για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- 16% και 83% για τη θερμότητα
- 18% και 90% για ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα
- 4% και 18% για τις μεταφορές.

Ακόμη η άμεση χρήση του βιοαερίου παρουσιάζει τις υψηλότερες αποδόσεις, ωστόσο περιορίζεται συνήθως σε τοποθεσίες που βρίσκονται κοντά στις εγκαταστάσεις αναερόβιας χώνευσης, περιορίζοντας τις διαθέσιμες αγορές και εφαρμογές. Τα υγρά καύσιμα έχουν το πλεονέκτημα της ευελιξίας, αλλά τα αποτελέσματα δείχνουν σταθερά χαμηλή απόδοση σε όλες τις διαδρομές και εφαρμογές. Η ενεργειακή απόδοση των διαδρομών βιομεθανίου ανταγωνίζεται καλά το βιοαέριο και έχει το πλεονέκτημα ότι μεταφέρεται και χρησιμοποιείται ευκολότερα σε μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν επίσης με τα ορυκτά καύσιμα και συζητήθηκαν στο πλαίσιο των εθνικών πολιτικών. Η έρευνα αυτή είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός ευέλικτου πλαισίου για τη σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης, το οποίο μπορεί να αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση της βιωσιμότητας των συστημάτων βιοαερίου σε ενέργεια σε μια σειρά δεικτών.

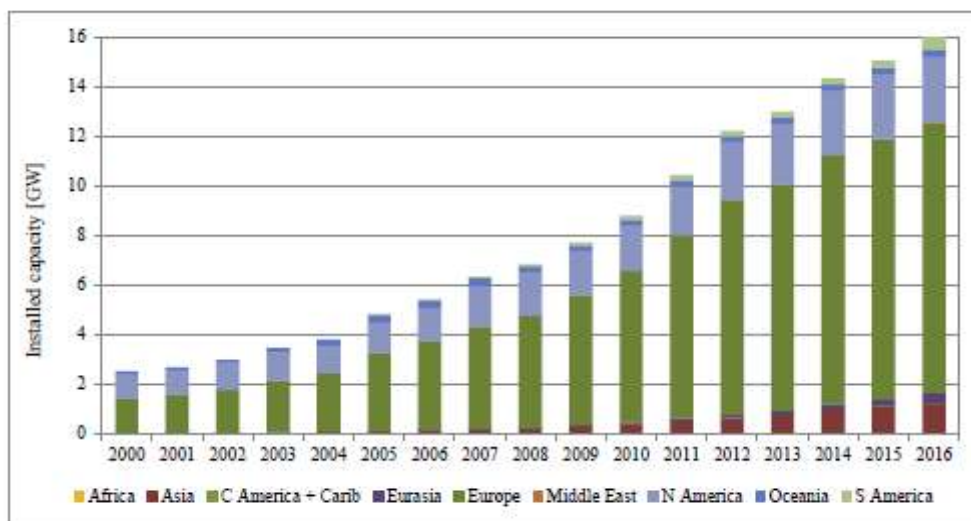
Κεφάλαιο 4^ο: Εφαρμογές ενεργειακής αξιοποίησης του Βιοαερίου

Εισαγωγή

Το κεφάλαιο 5^ο συντίθεται από το πρώτο μέρος που περιλαμβάνει τις εφαρμογές για την αξιοποίηση του βιοαερίου όπως έχουν διαμορφωθεί μέχρι τώρα στην Κίνα, στην Λατινική Αμερική και στις Ηνωμένες Πολιτείες. Στην συνέχεια αναλύει την αξιοποίηση του βιοαερίου στην Ευρώπη και τέλος την αξιοποίηση του βιοαερίου στην Ελλάδα.

4.1. Εφαρμογές ενεργειακής αξιοποίησης του βιοαερίου διεθνώς

Στις υποενότητες που ακολουθούν γίνεται περιγραφή των μονάδων βιοαερίου σε κομβικά σημεία παγκοσμίως όπως είναι η Κίνα, η Λατινική Αμερική, οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Ευρώπη. Στην Εικόνα που ακολουθεί φαίνεται συγκριτικά η παγκόσμια εξέλιξη των μονάδων βιοαερίου, παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 5.1: Η παγκόσμια εξέλιξη στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες βιοαερίου. (Πηγή: IREA, 2017)

4.1.1. Αξιοποίηση βιοαερίου στην Κίνα

Η αξιοποίηση του βιοαερίου στην Κίνα ξεκινάει το 1880 με την πρώτη προσπάθεια κατασκευής αναερόβιου χωνευτή στην Guangdong. Από το 1900 έως το 1990, οι χωνευτές βιοαερίου έχουν υποστεί δύο μετασχηματισμούς λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για βελτίωση της υγιεινής. Από τη δεκαετία του 1990, η αναερόβια χώνευση προς παραγωγή βιοαερίου έχει αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση του ενεργειακού ελλείματος και της περιβαλλοντικής ρύπανσης (Deng et al., 2017).

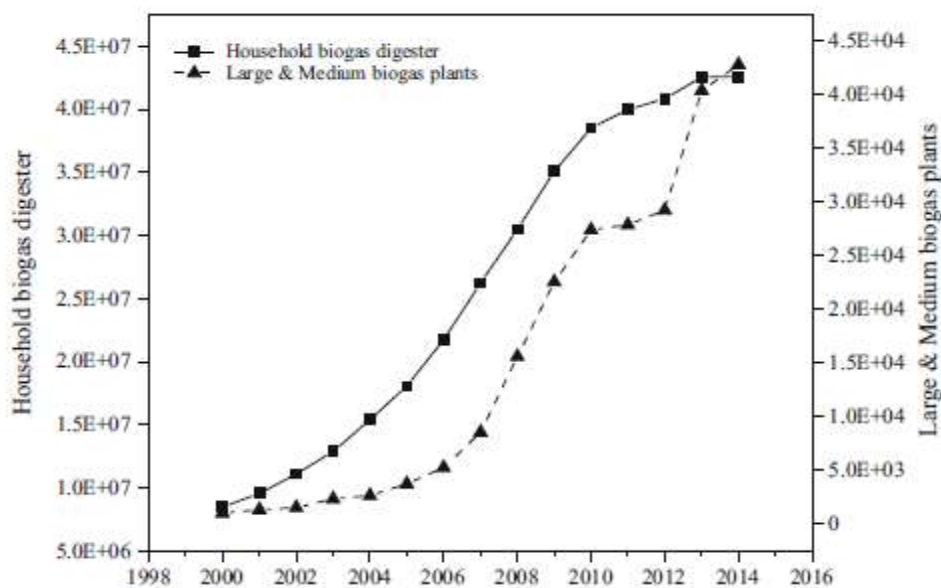
Από την μία πλευρά η Κίνα λόγω της έντονης αστικοποίησης και βιομηχανοποίησης αποτελεί την χώρα με την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας στον κόσμο. Το 2015, η συνολική κατανάλωση ενέργειας έφθασε τα 4,3 δισεκατομμύρια τόνους ισοδύναμου άνθρακα (tce), εκ των οποίων το 64% περίπου ήταν η κατανάλωση άνθρακα και το καθαρό εισαγόμενο φυσικό αέριο έφθασε τα 62,1 δισεκατομμύρια m³. Από την άλλη πλευρά η ανάπτυξη του βιοαερίου συνδέεται στενά, τόσο με τη γεωγραφική κατάσταση όσο και με την πολιτική της κυβέρνησης. Η γεωγραφική θέση της Κίνας οφείλει στην ανάπτυξη της γεωργίας και της κτηνοτροφίας, ως εκ τούτου διάφορα υλικά ζύμωσης μπορούν να αποκτηθούν ετησίως. Όπως εκτιμάται, η ποσότητα κοπριάς θα μπορούσε να φθάσει τα 4 δισεκατομμύρια τόνους το 2020 και επίσης θα μπορούσαν να συγκεντρωθούν περίπου 550 εκατομμύρια τόνοι υπολειμμάτων για τη διαδικασία ζύμωσης (MOA 2007). Επίσης, εκτιμάται ότι η κατασκευή αναερόβιου χωνευτή μεγάλης κλίμακας με χωρητικότητα βιομάζας της τάξης των 5000 κυβικών μέτρων μπορεί να καταναλώσει 30.000 τόνους κοπριάς ή 0,6 εκατομμύρια τόνους ξηρού άχυρου, μειώνοντας την εκπομπή του Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (COD) κατά 1500 τόνους ή των αιωρούμενων σωματιδίων κατά 90 τόνους.

Προκειμένου λοιπόν, να επιτευχθούν οι στόχοι της διάσκεψης κορυφής των G20 και της Παγκόσμιας Διάσκεψης για την Κλιματική Αλλαγή του Παρισιού, δηλαδή η αναλογία της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας στην ενέργεια από μη ορυκτές πηγές ενέργειας να αυξηθεί στο 20%, εκτιμάται ότι η κατασκευή μιας μονάδας

παραγωγής βιοαερίου με παραγωγικότητα 0,1 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων μπορεί να παράγει 3,65 εκατομμύρια κυβικά μέτρα, δηλ. 4343 tce, γεγονός που μπορεί να μειώσει την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας.

Η κινεζική κυβέρνηση υποστηρίζει σθεναρά την παραγωγή και την εφαρμογή της ενέργειας που προέρχεται από την καύση του βιοαερίου, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής δομής και την επίλυση του προβλήματος της ενεργειακής τροφοδοσίας των αγροτικών περιοχών της κινεζικής επικράτειας. Με αυτό τον τρόπο έχουν διαμορφωθεί εποικοδομητικές πολιτικές και έργα για την προώθηση της ανάπτυξης του βιοαερίου (Zhang et al., 2009)

Τα κύρια συστήματα αναερόβιας χώνευσης που έχουν αναπτυχθεί στην Κίνα είναι οι οικιακοί χωνευτές, και οι μονάδες αναερόβιας χώνευσης μεσαίας και μεγάλης κλίμακας (Zhang and Chen 2016). Στην Εικόνα 5.1 φαίνεται η πορεία εξέλιξης των αναερόβιων χωνευτών από το 2000 έως το 2014.



Εικόνα 5.5: Ποσοτική ανάλυση των αναερόβιων χωνευτών στην Κίνα από το 2000 έως 2014 (Πηγή: Bin Chen, Tasawar Hayat, Ahmed Alsaedi (2017))

Στις αναπτυσσόμενες περιοχές ή χώρες όπως είναι οι επαρχίες της Κίνας, το βιοαέριο παράγεται κυρίως σε μικρούς οικιακούς χωνευτές και χρησιμοποιείται ως καύσιμο για μαγείρεμα ή ακόμη και για φωτισμό σε σύγκριση με τις ανεπτυγμένες χώρες, όπου οι εξελίξεις στο βιοαέριο επικεντρώνονται σε μονάδες βιοαερίου

μεγάλης κλίμακας. Η ανάπτυξη οικιακών συστημάτων βιοαερίου, προωθείται έντονα με μεγάλα προγράμματα, σε περιοχές όπως (Κίνα, Ταϊλάνδη, Ινδία, Νεπάλ, Βιετνάμ, Μπαγκλαντές, Σρι Λάνκα και Πακιστάν), αφού λύνει την ενεργειακή ανεπάρκεια και μειώνει την κατανάλωση καυσόξυλων και την αποφυγή της αποψίλωσης, τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και βελτιώνει την γονιμότητα του εδάφους (Scarlat, 2018).

Τα τέσσερα πιο τυπικά συστήματα παραγωγής βιοαερίου στην Κίνα είναι τα εξής (Chen, 2017):

1. «Έξι σε Ένα» σύστημα παραγωγής βιοαερίου/ «Six-in-One» Biogas System (SIOBS)

Το σύστημα περιλαμβάνει, όπως προδίδει και το όνομα του, έξι διαδικασίες: την εκτροφή των χοίρων, την αναερόβια χώνευση, την καλλιέργεια, την καλλιέργεια φρούτων, την καλλιέργεια λαχανικών και τη γεωργική μεταποίηση. Είναι ιδιαίτερα δημοφιλές στην Νότια Κίνα, λόγω της επαρκούς και οικονομικής χρήσης των υποπροϊόντων ζύμωσης. Ο πυρήνας του SIOBS είναι ένας αντιδραστήρας ζύμωσης (8 m^3), που περιβάλλεται από ένα σύνολο υποστηρικτικών συσκευών για την επεξεργασία των πρώτων υλών, την αξιοποίηση του μεθανίου και την ανακύκλωση του υπολείμματος. Το SIOBS έχει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών γεωργικών πρακτικών και διαδικασιών διαχείρισης αποβλήτων: αφενός παρέχει καθαρό και φθινό καύσιμο μεθάνιο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την θέρμανση ή τον μηχανικό εξοπλισμό, από την άλλη πλευρά, μέσω της χώνευσης των οικιακών και γεωργικών αποβλήτων, είναι αποτελεσματικό στην επεξεργασία τόσο των υγρών όσο και των στερεών υπολλειμάτων της χώνευσης για την παραγωγή υποκατάστατων βασικών λιπασμάτων, καλυπτικών, προσθέτων ζωοτροφών κ.λπ., των οποίων η συμβατική παραγωγή συνδέεται με υψηλές εκπομπές ανεπιθύμητων αερίων.

Η ετήσια παραγωγή των συστημάτων SIOBS εκτιμάται σε 450 m^3 , δεδομένου ότι η μονάδα παραγωγής βιοαερίου λειτουργεί 300 ημέρες το χρόνο και παράγει κατά μέσο όρο $1,5 \text{ m}^3$ αερίων ημερησίως. Υπάρχουν τρεις οδοί χρήσης του βιοαερίου,

δηλ. θέρμανση, φωτισμός, και εναλλακτικά καύσιμα για κινητήρες ντίζελ, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την αντικατάσταση του άνθρακα, της ηλεκτρικής ενέργειας και του ντίζελ, αντίστοιχα. Το βιοαέριο πρέπει να αποθειωθεί πριν από οποιοσδήποτε εφαρμογή του. Οι συσκευές αποθείωσης εξετάζονται στον υπολογισμό της εκπομπής και της κατανάλωσης ενέργειας. Στη διαδικασία θέρμανσης, η απελευθέρωση των εκπομπών κατά την καύση του βιοαερίου λαμβάνεται επίσης υπόψη για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της. Ο φωτισμός του λαμπτήρα βιοαερίου είναι παρόμοιος με την κατανάλωση ρεύματος ενός λαμπτήρα πυράκτωσης 100 W. Το θερμαντικό σώμα βιοαερίου και ο λαμπτήρας βιοαερίου κοστίζουν συνολικά 30 kg χάλυβα, για διάρκεια ζωής 10 ετών (Jury et al., 2010).

II. Σύστημα βιοαερίου- καλλιέργειας και μεταποίησης λωτών/Biogas-persimmon cultivation and processing system (BCPS)

Ένα από τα πιο επιτυχημένα μοντέλα μέχρι στιγμής όσον αφορά την προσαρμογή της τεχνολογίας βιοαερίου στις τοπικές βιομηχανίες είναι η σύζευξη της παραγωγής βιοαερίου οικιακής χρήσης με την καλλιέργεια και την επεξεργασία λωτών (Diospyros kaki). Ένα μεγάλο μέρος του παραγόμενου βιοαερίου χρησιμοποιείται για καθημερινές δραστηριότητες οικιακής χρήσης (θέρμανση και φωτισμός). Όμως, στα πλαίσια του συστήματος των BCPS, υπάρχουν δύο οδοί για την χρήση του βιοαερίου. Οι δραστηριότητες επεξεργασίας των λωτών πριν την αποστολή τους στην αγορά περιλαμβάνουν τη διαλογή, τη συσκευασία, και την αποθήκευση (για να διατηρηθούν φρέσκα). Η έγχυση λοιπόν βιοαερίου έχει βρεθεί ότι είναι μια ανταγωνιστική τεχνική για να διατηρούνται τα φρούτα φρέσκα. Αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι το βιοαέριο μπορεί να ρυθμίσει την σύνθεση του αέρα της αποθήκης λόγω υψηλής περιεκτικότητας σε CH₄ και CO₂ και ελάχιστης O₂, ως εκ τούτου μειώνεται η ένταση της αναπνοής των φρούτων και μειώνεται και η απελευθέρωση του αιθυλενίου. Σε ένα BCPS απαιτούνται μόνο 10 m³ αέρα για το σκοπό αυτό. Και σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα αποθήκευσης, η μείωση της ποσότητας χαλασμένου λωτού είναι ισοδύναμη με αύξηση της παραγωγής κατά 300 kg ετησίως, δηλ. προκύπτει επιπλέον εισόδημα \$ 23,2 λόγω αυτής της εφαρμογής.

III. Μονάδα επεξεργασία λυμάτων /Wastewater treatment plants (WWTPs)

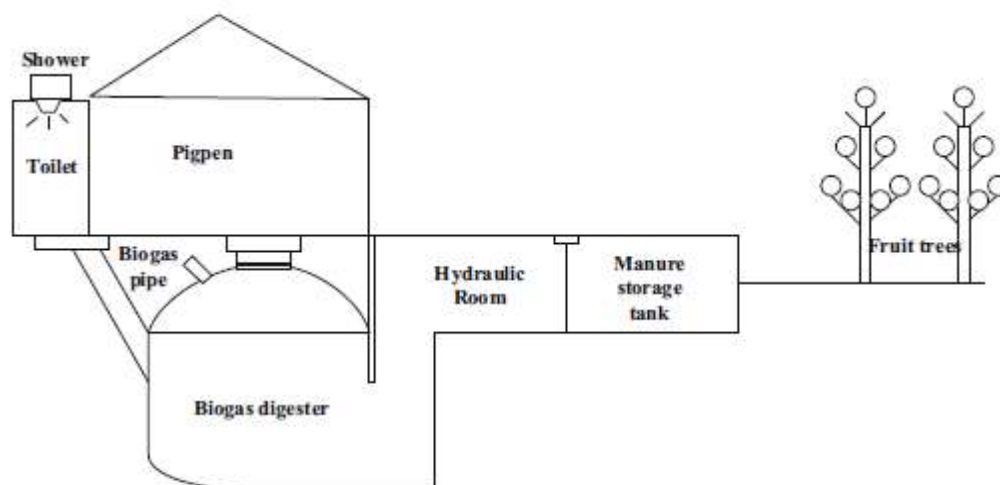
Μία μικρής κλίμακας δημοτική μονάδα καθαρισμού λυμάτων αποτελείται κυρίως από τρεις δεξαμενές επεξεργασίας: πρωτογενούς επεξεργασίας, αναερόβιου χωνευτή και φίλτρων. Η δεξαμενή καθίζησης και ο αναερόβιος χωνευτής ήταν υπεύθυνοι για τα στάδια χώνευσης των λυμάτων και καθαρισμού, όπου παρήχθη το βιοαέριο. Στο στάδιο της λειτουργίας της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων, 6000 τόνοι οικιακών αποβλήτων διατέθηκαν σε ετήσια βάση και η ετήσια παραγωγή βιοαερίου από την επεξεργασία λυμάτων ήταν 630 m³. Το βιοαέριο και η παραγόμενη ιλύς αποτελούν ταυτόχρονα προϊόντα και πόροι αφού με τις κατάλληλες τεχνικές και εξοπλισμό, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν από το εργοστάσιο και να δημιουργήσουν κυκλική διαδρομή στην οποία η εκμετάλλευση των πόρων παράγει απόβλητα και τα παραγόμενα απόβλητα αποτελούν εκμεταλλεύσιμοι πόροι.

IV. «Τρία σε Ένα» σύστημα παραγωγής βιοαερίου/ "Three-in-One" biogas project (TIOBS)

Το σύστημα «τρία σε-ένα» είναι το πιο κοινό και αντιπροσωπευτικό σύστημα αξιοποίησης του βιοαερίου στη Νότια Κίνα. Με την έναρξη του προγράμματος αγροτικών οικοσυστημάτων, το οποίο στοχεύει στην προώθηση της χρήσης του αγροτικού οικιακού βιοαερίου, ορισμένες επαρχίες της νότιας Κίνας, όπως το Anhui, Chongqing, Hubei, Hunan και Guangxi, επελέγησαν ως πιλότοι του "Τρία σε ένα " συστήματος αξιοποίησης βιοαερίου. Οι κοινωνικοοικονομικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η βιωσιμότητα αυτού του τρόπου αξιοποίησης του βιοαερίου "Τρία-σε-Ένα" θα πρέπει να αναλυθούν πριν από την περαιτέρω προώθηση του, έτσι ώστε να ρίξουν φως στην περίπτωση εφαρμογής του σε μεγάλη κλίμακα.

Σύμφωνα με την μελέτη πιλοτική μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Yang and Che (2014), το «τρία-σε-ένα» συνδέει ένα οικιακό αποχετευτικό σύστημα, ένα χοιροστάσιο, και μια φυτεία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2. Η ανθρώπινη και ζωική κοπριά είναι η πρώτη ύλη του συστήματος. Το βιοαέριο που παράγεται στον αναερόβιο χωνευτή τροφοδοτείται στα νοικοκυριά ως καύσιμο. Τα συν-προϊόντα

της χώνευσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως λίπασμα για σπόρους και οπωροφόρα δέντρα. Ο πυρήνας αυτού του συστήματος είναι η κατασκευή του αναερόβιου χωνευτή.



Εικόνα 5.6: Σύστημα «τρία σε ένα» για την παραγωγή και αξιοποίηση βιοαερίου (Πηγή: Yang and Chen 2014)

Λαμβάνοντας υπόψη την ευκολία στην διαχείριση του, τον ρυθμό παραγωγής αερίου και την θερμοκρασία, ο χωνευτής θα πρέπει να κατασκευαστεί με τα χαρακτηριστικά "στρογγυλού σχήματος, μικρής χωρητικότητας και ρηχός". Στην μελέτη των Yang and Che (2014), τα κύρια μέρη ενός τέτοιου χωνευτή είναι ένας σωλήνας τροφοδοσίας, ο χωνευτής, ο χώρος αποθήκευσης του βιοαερίου, ο υδραυλικό χώρος και σωλήνες αερίου. Ως φθηνή πρώτη ύλη επέλεξαν για την μελέτη το άχυρο και τη ζωική κοπριά. Ο χωνευτής θα πρέπει να αναπληρώνεται μία ή δύο φορές ετησίως, προκειμένου να ικανοποιηθεί ο μεταβολισμός των μεθανογενών οργανισμών, εκτός από τον κανονικό ανεφοδιασμό κάθε χρόνο, για την συνήθη συντήρηση του απαιτείται η φόρτιση και η εκφόρτιση του. Ακόμη, για την λειτουργία του χωνευτή καταναλώνεται βενζίνη όποτε προτεραιότητα έχει η χρήση των τοπικών πόρων για την μείωση του κόστους μεταφοράς. Κατά τη διάρκεια της συνολικής φάσης αξιοποίησης, το βιοαέριο καίγεται ως υποκατάστατο του συμβατικού άνθρακα και του άχυρου. Εν τω μεταξύ, τα υπολείμματα της χώνευσης χρησιμοποιούνται για πολλαπλούς σκοπούς, συμπεριλαμβανομένων των ζωοτροφών εκτροφής, των οργανικών λιπασμάτων και των εμβολιασμένων σπόρων.

4.1.2. Αξιοποίηση βιοαερίου στην Λατινική Αμερική

Το δίκτυο για τους βιολογικούς χωνευτές (Biodigesters) στην Λατινική Αμερική και το Καραϊβική (RedBioLAC) προωθούν την ανάπτυξη μικρών βιολογικών χωνευτών στη Βολιβία, την Κόστα Ρίκα, τον Ισημερινό, το Μεξικό, τη Νικαράγουα και το Περού. Στην Βολιβία υπάρχουν πάνω από 1000 εγκατεστημένες μονάδες παραγωγής βιοαερίου. Επίσης, μεγάλης κλίμακας μονάδες παραγωγής βιοαερίου έχουν κατασκευαστεί για τη χρήση αποβλήτων από ελαιοτριβεία φοινικέλαιου και από μεγάλες φάρμες στην Κολομβία, την Ονδούρα και την Αργεντινή (Karoor and Vijay, 2013). Η Βραζιλία, το 2015, είχε 127 μονάδες βιοαερίου που χρησιμοποιούσαν υπολείμματα γεωργικών και βιομηχανικών αποβλήτων, βιοαπόβλητα, ιλύ λυμάτων και αέριο υγειονομικής ταφής, το οποίο παρήγαγε περίπου 1,6 εκατομμύρια Nm³ / ημέρα (584 δισεκατομμύρια m³ βιοαερίου / έτος) που αντιστοιχούσε σε 3835 GWh ενέργειας. (IEA, 2014; Vogeli et al. 2014) Τέλος, η εγκατεστημένη δυναμικότητα παραγωγής ηλεκτρισμού από βιοαέριο αυξήθηκε σημαντικά τα τελευταία χρόνια, φθάνοντας τα 196MW το 2015 και τα 450MW το 2016 (IREA, 2016).

4.1.3. Αξιοποίηση βιοαερίου στις Ηνωμένες Πολιτείες

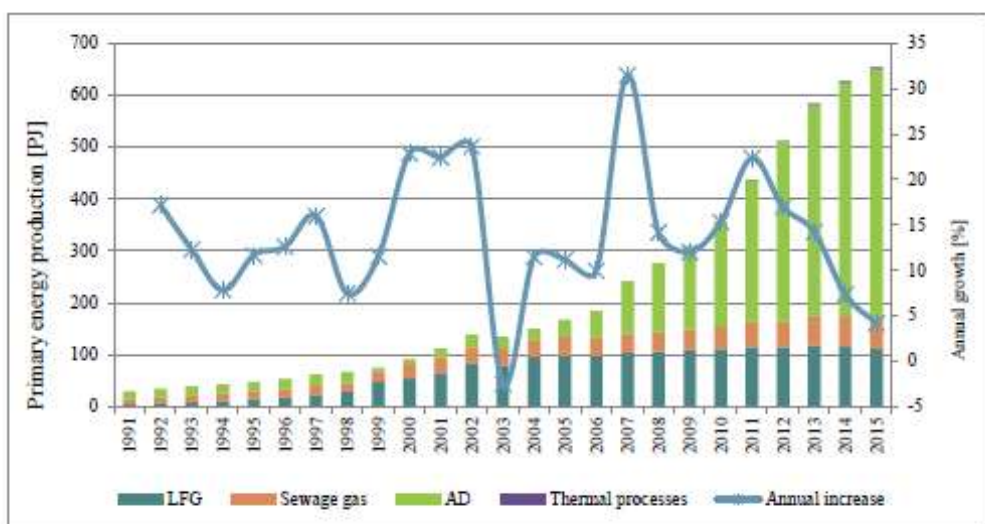
Στις Ηνωμένες Πολιτείες, το 2017 υπήρχαν περισσότερες από 2100 μονάδες βιοαερίου, από τις οποίες οι 250 βρίσκονται στον κτηνοτροφικό τομέα και καταναλώνουν ως πρώτη ύλη ζωική κοπριά (US EPA, 2017), οι 654 μονάδες ανακτούν το βιοαέριο από χώρους υγειονομικής ταφής (US EPA, 2017) και οι 1240 λειτουργούν σε Μονάδες Επεξεργασίας Λυμάτων. Σχεδόν όλες οι μονάδες βιοαερίου μονάδων επεξεργασίας λυμάτων, κατασκευάζονται σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας, που επεξεργάζονται εκατοντάδες εκατομμύρια γαλιόνια λυμάτων ημερησίως (ABC, 2017). Όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας, οι μονάδες βιοαερίου είχαν εγκατεστημένη ισχύ ηλεκτρισμού 2400MW το 2015 και 2438MW το 2016, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια 1030 GWh (US EPA, 2017). Το ενεργειακό δυναμικό του βιοαερίου στις Ηνωμένες Πολιτείες εκτιμήθηκε στα 18,5

δισεκατομμύρια m³ βιοαερίου / έτος, εκ των οποίων τα 7,3 δισεκατομμύρια m³ προέρχονται από την χώνευση κοπριάς, τα 8,0 δισεκατομμύρια m³ από χώρους υγειονομικής ταφής και τα 3,2 δισεκατομμύρια m³ από μονάδες επεξεργασίας λυμάτων και θα μπορούσαν να παράγουν περίπου 41,2 TWh ηλεκτρικής ενέργειας (ABS, 2017).

4.1.4. Αξιοποίηση βιοαερίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Την τελευταία δεκαετία η ποσότητα του βιοαερίου, που ανακτάται από χώρους υγειονομικής ταφής, παραμένει σταθερή. Η κύρια συνεισφορά, που παίζει ρόλο στην αύξηση του παραγόμενου βιοαερίου γίνεται από τους αναερόβιους χωνευτές και πολύ λιγότερο από το βιοαέριο των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων.

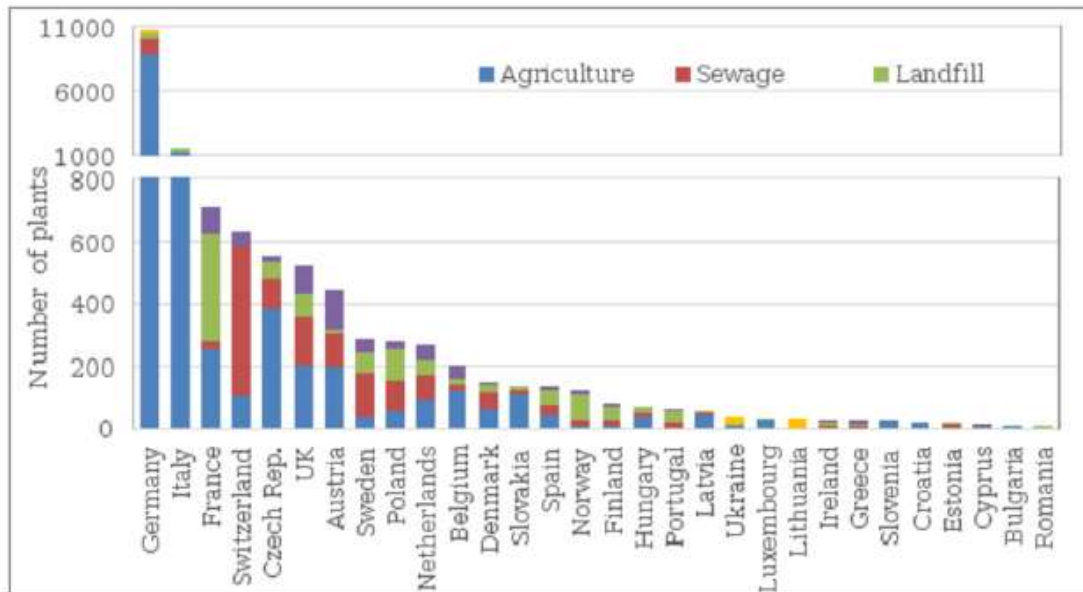
Το μεγαλύτερο μέρος του βιοαερίου στην ΕΕ χρησιμοποιείται ως καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρισμού, είτε σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή σε συνδυασμένες μονάδες παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (CHP) με σκοπό την μέγιστη χρήση της θερμότητας για την αύξηση των εσόδων και τη βελτίωση των οικονομικών δυνατοτήτων των μονάδων παραγωγής βιοαερίου. Συχνότερα χρησιμοποιούνται οι μηχανές αερίου, οι οποίες μπορούν να φτάσουν σε ηλεκτρική απόδοση 35-40%, ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος του κινητήρα αερίου (Foreest, 2012). Το 2015, το βιοαέριο που χρησιμοποιήθηκε στην Ευρωπαϊκή Ένωση για παρήγαγε 61 TWh (219 PJ) ηλεκτρικής ενέργειας και 26,6 PJ θερμότητας που πωλήθηκε σε δίκτυα τηλεθέρμανσης (Eurostat, 2017). Στην Εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η εξέλιξη της παραγόμενης ποσότητας βιοαερίου και την αντίστοιχης παραγόμενης ενέργειας ανά έτος και με βάση την προέλευση του.



Εικόνα 5.7: Η εξέλιξη της πρωτογενούς παραγόμενης ενέργεια από βιοαέριο. (Πηγή: Eurostat, 2017)

Όμως στην Ευρωπαϊκή Ένωση η κατάσταση με τις μονάδες βιοαερίου παρουσιάζει ιδιαίτερη ποικιλία μεταξύ των κρατών μελών, ως προς τις παραγόμενες ποσότητες και ως την προέλευση του (αναερόβια χώνευση, ΧΥΤΑ, ΜΕΛ). Ετσι λοιπόν έχουν παρατηρηθεί μεγάλες αποκλίσεις στην κατανάλωση βιοαερίου μεταξύ των χωρών, ενώ ο μέσος όρος βρίσκεται στο 4%, η Γερμανία παρουσιάζει ποσοστό της τάξης των 12 %.

Οι κορυφαίες χώρες στην παραγωγή βιοαερίου στην ΕΕ είναι η Γερμανία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ιταλία, η Τσεχική Δημοκρατία και η Γαλλία. Η Γερμανία είναι ο ευρωπαϊός ηγέτης με παραγωγή βιοαερίου 329 PJ και μερίδιο 50% της συνολικής παραγωγής βιοαερίου στην ΕΕ για το 2015. Η υψηλότερη ποσότητα βιοαερίου προέρχεται από την αναερόβια χώνευση στη Γερμανία, την Ιταλία, την Τσεχική Δημοκρατία και τη Γαλλία, ακολουθούμενη από το ανακτόμενο βιοαέριο των χωρών υγειονομικής ταφής στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Ιταλία, τη Γαλλία και την Ισπανία. Το βιοαέριο των χωρών υγειονομικής ταφής κυριαρχεί επίσης στην αγορά της Πορτογαλίας, της Εσθονίας, της Ιρλανδίας, της Ελλάδας και του Ηνωμένου Βασιλείου, ενώ το βιοαέριο από την επεξεργασία λυμάτων επικρατεί σε λίγες χώρες, όπως η Σουηδία, η Πολωνία και η Λιθουανία (Eurostat, 2017). Στην Εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ο αριθμός των μονάδων βιοαερίου ανά χώρα της Ευρώπης, καθώς και την αναλογία ως προς το είδος της μονάδας.



Εικόνα 5.8: Ο αριθμός και το είδος των μονάδων βιοαερίου ανά Ευρωπαϊκή χώρα. (Πηγή: EBA, 2016)

Ο αριθμός, το είδος και το μέγεθος των μονάδων ποικίλει από χώρα σε χώρα αλλά και εντός της ίδιας χώρας, από μικρές μονάδες αναερόβιας χώνευσης που βρίσκονται σε φάρμες μέχρι μεγάλη κλίμακας αναερόβιους χωνευτήρες που μπορούν να χωνεύσουν παραπάνω από ένα είδος πρώτης ύλης (υποστρώματος). Οι περισσότερες εγκαταστάσεις βιοαερίου είναι έχουν δυναμική 100-500 kW (ηλεκτρική ισχύς) και μόνο ένα μικρό μέρος του βιοαερίου χρησιμοποιείται σε λέβητες για την παραγωγή θερμότητας για γεωργική χρήση ή σε βιομηχανικές εφαρμογές για παραγωγή ατμού (Scarlat,2018)

4.2 Αξιοποίηση βιοαερίου στην Ελλάδα

Σύμφωνα με δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν από την Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, έως και το 2015 έχουν δοθεί 92 άδειες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα. Εκ των οποίων οι 31 είναι μονάδες βιοαερίου με συνολική ισχύ 57MW. Αναλυτικότερα, το 2016 λειτουργούσαν: 4 μονάδες παραγωγής και αξιοποίησης βιοαερίου σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤΑ) με συνολική ισχύ 29,7 MW, 3 μονάδες παραγωγής και αξιοποίησης βιοαερίου σε Μονάδες Επεξεργασίας

Λυμάτων με συνολική ισχύ 14,5 MW και 22 μονάδες παραγωγής και αξιοποίησης βιοαερίου σε αγρο – κτηνοτροφικές μονάδες με συνολική ισχύ 12,8MW. Η καύση αυτής της ποσότητας βιοαερίου παράγει ηλεκτρική ενεέργεια της τάξης των 253GWh. Ενώ με την ΔΕΔΔΗΕ έχουν υπογράψει σύμβαση σύνδεσης 23 έργα βιοαερίου με συνολική ισχύ 35,6MW και βρίσκονται υπό διαδικασία αδειοδότησης 199 έργα βιομάζας ισχύος 242,5MW.

Τα έργα που σχετίζονται με την παραγωγή και την αξιοποίηση του βιοαερίου στην Ελλάδα κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες σύμφωνα με την ΦΕΚ 2471/Β`/10.8.2016: «Υ.Α. ΔΙΠΑ/οικ. 37674/2016 - Τροποποίηση και κωδικοποίηση της υπουργικής απόφασης 1958/2012 - Κατάταξη δημοσίων και ιδιωτικών έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες και υποκατηγορίες σύμφωνα με το άρθρο 1 παράγραφος 4 του Ν. 4014/21.9.2011 (ΦΕΚ 209/Α/2011) όπως αυτή έχει τροποποιηθεί και ισχύει»:

I. Συστήματα περιβαλλοντικών υποδομών

Είδος έργου ή δραστηριότητας	Υποκατηγορία A1	Υποκατηγορία A2	Κατηγορία Β	Παρατηρήσεις
Εγκαταστάσεις επεξεργασίας μη επικίνδυνων αποβλήτων προς παραγωγή βιοαερίου (εργασία R3) α) Παραγωγή βιοαερίου	α) $Q \geq 100.000$ t/έτος β) $Q \geq 50.000$ t/έτος	α) $Q < 100.000$ t/έτος β) $Q < 50.000$ t/έτος		Q: Ετήσια παροχή αποβλήτων προς επεξεργασία.

Πίνακας 5.1: Συστήματα περιβαλλοντικών υποδομών που σχετίζονται με την παραγωγή βιοαερίου

II. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

α/α	Είδος έργου ή δραστηριότητας	Υποκατηγορία A1	Υποκατηγορία A2	Κατηγορία Β	Παρατηρήσεις

6	α) Ηλεκτροπαραγωγή με καύση βιοαερίου	$P \geq 3 \text{ MW}$	$P < 3 \text{ MW}$		P: εγκατεστημένη ισχύς Q: Ετήσια παροχή πρώτης ύλης προς επεξεργασία Ηλεκτροπαραγωγή από σταθμούς βιοαερίου που παράγεται σε ΧΥΤΑ ακολουθεί την κατάταξη του ΧΥΤΑ
	β) Εγκαταστάσεις παραγωγής βιοαερίου, από μη επικίνδυνα απόβλητα (εργασία R3), προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	Κατατάσσονται σύμφωνα με το Παράρτημα IV	Κατατάσσονται σύμφωνα με το Παράρτημα IV		
	γ) Εγκαταστάσεις παραγωγής βιοαερίου προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη ενεργειακά φυτά και ενσιρώματα	$Q \geq 150.000 \text{ t/έτος}$	$Q < 150.000 \text{ t/έτος}$		

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν μερικές λειτουργικές μονάδες βιοαερίου στον ελλαδικό χώρο.

- Μονάδα βιοαερίου σε Μονάδα Επεξεργασίας Λυμάτων
Στην Μονάδα Επεξεργασίας Λυμάτων της Ψυττάλειας τα εισερχόμενα υγρά απόβλητα όχι μόνο επεξεργάζονται, αλλά αποτελούν ταυτόχρονα πηγή ενέργειας. Συγκεκριμένα, η παραγόμενη μικτή ιλύς χωνεύεται προς παραγωγή βιοαερίου που

χρησιμοποιείται ως καύσιμο στις δύο μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, με συνολική ηλεκτρική ισχύ 11,4 MW και θερμική ισχύ 17,3 MW (www.eydap.gr).

Τα πλεονεκτήματα από τη λειτουργία της Μονάδας Συμπαραγωγής Θερμικής και Ηλεκτρικής ενέργειας είναι (www.eydap.gr):

(α) οικονομικά, καθώς επιτυγχάνεται μείωση του λειτουργικού κόστους και έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στον ΛΑΓΗΕ,

(β) περιβαλλοντικά, όπως:

- Η μειωμένη εκπομπή αέριων ρύπων από την ελεγχόμενη καύση του βιοαερίου σε κινητήρες εσωτερικής καύσης και όχι σε δαυλούς, όπως γινόταν πριν την κατασκευή των μονάδων
- Η αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων με ανανεώσιμη πηγή ενέργειας
- Το δικαίωμα να λάβει η ΕΥΔΑΠ περισσότερα δωρεάν δικαιώματα εκπομπών αέριων ρύπων θερμοκηπίου από ό,τι αν δεν υπήρχαν οι μονάδες βιοαερίου, ενώ η λειτουργία τους δε μειώνει τα ανωτέρω δικαιώματα, αφού πρόκειται για εκπομπές ανανεώσιμης πηγής ενέργειας.
- Η αυτοδυναμία της εγκατάστασης του κέντρου της Ψυττάλειας, καθώς μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα από τη διαθεσιμότητα ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου της ΔΕΗ, εξασφαλίζοντας έτσι την αποδοτική και συνεχή λειτουργία των εγκαταστάσεων.

- Μονάδα βιοαερίου στον Χ.Υ.Τ.Α Άνω Λιοσίων, Αθήνα-Αττική

Ο σταθμός συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 23.5 MW καταναλώνει περίπου 12,000 m³/h βιοαέριο το οποίο αντλείται και οδηγείται στο σταθμό μέσω δικτύου κάθετων και οριζοντίων αγωγών αφού πρώτα υποστεί την κατάλληλη διεργασία ψύξεως και αφύγρανσης πριν εισέλθει στις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης. Από την καύση του ανακτώμενου βιοαερίου παράγονται ετησίως 134.8 GWh θερμικής ενέργειας και 112.5 GWh ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης η ανακτώμενη θερμική ενέργεια από το κύκλωμα ψύξης των μηχανών τροφοδοτείται στους εξατμιστές των

στραγγισμάτων των ΧΥΤΑ στην παρακείμενη εγκατάσταση βιολογικού καθαρισμού του ΕΔΣΝΑ (<http://www.beal.gr>).

Τα πειβαλλοντικά οφέλη της μονάδας βιοαερίου είναι τα εξής (<http://www.beal.gr>):

- Η καταστροφή του παραγόμενου μεθανίου (CH₄) εντός των ΧΥΤΑ, το οποίο είναι 21 φορές δραστικότερο από το CO₂ όσον αφορά το φαινόμενο του θερμοκηπίου, με την
- Η παράλληλη ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου για παραγωγή ηλεκτρική και θερμικής ενέργειας
- Η μονάδα έχει δυναμική περίπου 175,000,000 kWh/ έτος, ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας, υποκαθιστώντας ορυκτά καύσιμα που θα απαιτούνταν για την αντίστοιχη παραγωγή ενέργειας, με αποτέλεσμα την αποφυγή έκλυσης επιπλέον διοξειδίου του άνθρακα κατά 148,000 t ετησίως.
- Η δυνατότητα αξιοποίησης της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας στους εξατμιστές στραγγισμάτων μπορεί προσφέρει εξοικονόμηση κατανάλωσης 400 λίτρων πετρελαίου την ώρα.

4.6. Ανακεφαλαίωση

Στο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μια εκτενής ανάλυση της αξιοποίησης του βιοαερίου σε διάφορες περιοχές στον κόσμο (Κίνα, Λατινική Αμερική, Ηνωμένες Πολιτείες, Ευρώπη) και στην συνέχεια στην τελευταία ενότητα επικεντρώθηκε στην αξιοποίηση του βιοαερίου στην Ελλάδα και περιγράφησαν η μονάδα βιοαερίου της Ψυτάλλεια και του ΧΥΤΑ των Ανώ Λιοσίων στην Αττική.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : Προοπτικές στην ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου

Εισαγωγή

Το κεφάλαιο που ακολουθεί συντίθεται από τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος αναλύονται οι προοπτικές αξιοποίησης του βιοαερίου στην Ελλάδα. Στην δεύτερη ενότητα περιγράφεται το μέλλον το βιοαερίου στην Ευρώπη και στην Τρίτη ενότητα αναλύονται οι προοπτικές της κεντρικής διεργασίας για την παραγωγή του βιοαερίου, δηλαδή της αναερόβιας χώνευσης.

5.1 Προοπτικές αξιοποίησης του βιοαερίου στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα βρίσκονται σε λειτουργία πολλοί ΧΥΤΑ, εκ των οποίων μέχρι το 2016 μόνο τέσσερις αξιοποιούσαν το παραγόμενο βιοαέριο για την παραγωγή ενέργειας, μέρος της οποίας διοχετευόταν στο δίκτυο της ΔΕΔΔΗΕ. Με την πάροδο των χρόνων και τις συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις αλλά και την αυστηρή απαίτηση το 20% της παραγόμενης ενέργειας να προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, όλο και περισσότεροι ΧΥΤΑ δημιουργούν μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από το βιοαέριο που παράγουν τα απορρίμματα.

Πρόσφατο παράδειγμα αποτελεί ο ΧΥΤΑ Δυτικής Μακεδονίας στον οποίο θα κατασκευαστεί, από την διαδημοτική εταιρία των δήμων δυτικής Μακεδονίας (ΔΙΑΔΥΜΑ ΑΕ) και την « Κοινοπραξία ΗΛΕΚΤΩΡ Α.Ε. – THALIS E.S.», μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος ισχύος 1MW , το οποίο θα παράγεται από το βιοαέριο που παράγουν τα απορρίμματα και μέρος αυτού θα τροφοδοτεί το δίκτυο διανομής ηλεκτρισμού. Η μονάδα προβλέπεται να βρίσκεται σε λειτουργία το τέλος του 2019. (<http://www.voria.gr/article/kozanimonada-paragogis-ilektrikis-energias-aro-vioaerio-aporrimmaton>)

Επιπροσθέτως, μέχρι το 2014, η παραγωγή βιοαερίου στην Ελλάδα ήταν περιορισμένη και αφορούσε κυρίως τη συλλογή του βιοαερίου από χώρους υγειονομικής ταφής ή την χώνευση αστικής λυματολάσπης, αντιπροσωπεύοντας το

95% των εγκαταστάσεων βιοαερίου (EurObserve'ER 2014). Όμως ο ελλαδικός χώρος έχει μεγάλο δυναμικό στην παραγωγή βιοαερίου από αγρο – κτηνοτροφικές μονάδες δηλαδή από την χώνευση κτηνοτροφικών αποβλήτων και γεωργικών υπολειμμάτων. Πριν, το 2014 η τιμολόγηση της παραγόμενης MWh κυμαινόταν σε χαμηλά επίπεδα (75 €/MWh) καθιστώντας τις μονάδες βιοαερίου στον αγρο – κτηνοτροφικό τομέα οικονομικά μη βιώσιμες. Όμως, το 2014 οι τιμές της MWh σταθεροποιήθηκαν βάση νομοθεσίας σε ικανοποιητικά επίπεδα (190–230 €/MWh) και δημιούργησαν έντονο ενδιαφέρον για την παραγωγή βιοαερίου στη χώρα. Έχουν εγκατασταθεί ήδη πολλές εγκαταστάσεις γεωργικού βιοαερίου, βασισμένες κυρίως στη χρήση οργανικών αποβλήτων και λυμάτων, ενώ πολλές άλλες βρίσκονται στην φάση του σχεδιασμού.

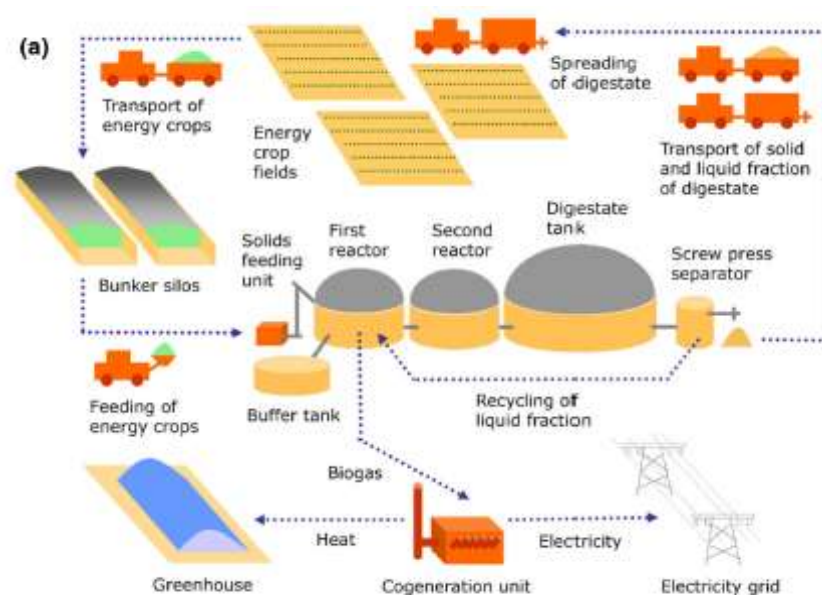
Ο Νασιάδης (2016) εξέτασε την περίπτωση δημιουργίας μονάδων παραγωγής βιοαερίου και εδαφοβελτιωτικού στο νομό Πιερίας, εκτιμώντας το κόστος κατασκευής και λειτουργίας των μονάδων βιοαερίου, των μονάδων συμπαραγωγής ενέργειας και του κόστους του εδαφοβελτιωτικού. Σύμφωνα με τυπικές βιβλιογραφικές τιμές για την απόδοση της συγκέντρωσης των ολικών και πτητικών στερεών των πτηνοκτηνοτροφικών αποβλήτων προέκυψε ότιτο συνολική εκτιμώμενη ημερήσια και ετήσια παραγωγή βιοαερίου στον Μ. Πιερίας, υπολογίστηκε 21764 m³/day και 7943860 m³/year, αντιστοίχως. Επίσης, σύμφωνα με τυπικές βιβλιογραφικές τιμές για την απόδοση της συγκέντρωσης των γεωργικών υπολειμμάτων όπως προέκυψε ότι το συνολική εκτιμώμενη ημερήσια και ετήσια παραγωγή βιοαερίου στον Μ. Πιερίας, υπολογίστηκε 28595 m³/day και 19277147 m³/year, αντιστοίχως. Θεωρώντας την θερμογόνο δύναμη του βιοαερίου 21 MJ/m³, το ενεργειακό περιεχόμενο του βιοαερίου 6KWh/m³, και το περιεχόμενο μεθάνιο 60%, προκύπτει ότι το συνολικό ενεργειακό περιεχόμενο είναι ίσο με: 115662882KWh/y. Τέλος, η καύση του παραγόμενου βιοαερίου σε μονάδα συμπαραγωγής (ΣΗΘ) ηλεκτρικής ενέργειας με κινητήρα που παράγει 35% ηλεκτρική και 75% θερμική ενέργεια λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό απόδοσης των ΣΗΘ, 90% και βαθμό απόδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας 24 – 40%, προκύπτει ότι ή συνολική παραγόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια άνα έτος στην Πιερία είναι 26,02 – 41,63 GWh/y και 62,46 – 78,07GWh/y, αντίστοιχα. Ένα μέρος της

ενέργειας. Περίπου 10- 15 % χρησιμοποιείται για τις ανάγκες των μονάδων ενώ το υπόλοιπο μπορεί να πωληθεί. Αντίστοιχα ένα μέρος της θερμικής ενέργειας, περίπου 20 – 30 % μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ίδια κατανάλωση και το υπόλοιπο μπορεί να διατεθεί προς πώληση, εφόσον υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα τηλεθέρμανσης. Παράλληλα, ένα από τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα της αναερόνιας χώνευσης, πέρα από την παραγωγή βιοαερίου και κατ' επέκταση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, είναι η παραγωγή χωνεμένου υπολείμματος το οποίο εφόσον πληρεί τις προδιαγραφές της εγκυκλίου 4/1604.81/3-4-2012 του ΥΠΕΚΑ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό.

Στην συνέχεια ο Νασιάδης (2016) αναλύοντας τα κόστη, τα έσοδα και τον Δείκτη Απόδοσης της Επένδυσης (IRR) μιας τέτοιας μονάδας, δεδομένου της εξασφάλισης σταθερή τιμής ανά MWh, από το κράτος με νόμους (για P (=εγκατεστημένη ισχύ) \leq 3MW ανέρχεται σε 225 Ευρώ/MWh και για P = >3 MW ανέρχεται σε 204 Ευρώ/MWh) και λαμβάνοντας υπόψη το δυναμικό βιομάζας της Πιερίας καθώς και ότι στον νομό δεν δραστηριοποιείται καμία μονάδα παραγωγής βιοαερίου από αγρο – κτηνοτροφικά απόβλητα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η δημιουργία περισσότερων από μία μονάδων βιοαερίου στον Ν. Πιερίας, είναι δυνατή και βιώσιμη. Φυσικά, η ποιότητα της βιομάζας, το μέγεθος των μονάδων και η χωροθέτηση τους θεωρεί ότι χρίζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Οι Markou et al. 2017 ερεύνησαν μια υπολογιστική μέθοδο με σκοπό να αξιολογήσουν την οικονομική σκοπιμότητα παραγωγής ενεργειακών καλλιεργειών, ως πρώτης ύλης για την Αναερόβια Χώνευση, στο πλαίσιο της Βόρειας Ελλάδας. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε για τις εξής ενεργειακές καλλιέργειες, οι οποίες είναι καλά εδραιωμένες στην Ελλάδα: τριτικάλε (σίτος), καλαμπόκι, μηδική (ψυχανθές), ηλιάνθος, τριφύλλι, κριθάρι και σιτάρι. Επιπλέον, διερευνήθηκε η σύζευξη του αναερόβιου χωνευτή με φυτικό θερμοκήπιο, με στόχο τη μερική ανάκτηση της θερμικής ενέργειας που παράγεται στη μονάδα CHP της Εικόνας 6.1. Η μελέτη παρείχε λεπτομερείς οικονομικές προσομοιώσεις για τις ακόλουθες διαδικασίες: (1) καλλιέργεια ενεργειακών καλλιεργειών ως πρώτη ύλη για την AD, (2) παραγωγή βιοαερίου και ηλεκτρικής ενέργειας μέσω Αναερόβιας Χώνευσης και

(3) καλλιέργεια φυτών λαχανικών (ντομάτα) σε θερμοκήπιο, με χρήση θερμικής ενέργειας αποβλήτων από τη μονάδα CHP (Esen και Yuksel 2013)



Εικόνα 6.1: Σχεδιάγραμμα της μονάδας παραγωγής βοαερίου από καλλιέργεια ενεργειακών φυτών σε συνδυασμό με εγκατάσταση θερμοκηπίου για ενεργειακή αξιοποίηση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας. (Πηγή: Markou et. al. 2017)

Στην οικονομική ανάλυση που πραγματοποιήσαν έλαβαν υπόψη τους τα εξής στοιχεία:

- I. Τα έξοδα για την καλλιέργεια και παραγωγή των ενεργειακών φυτών όπως:
 - i. Την απαραίτητη έκταση καλλιεργήσιμης γής, συμπεριλαμβανομένων απωλειών όπως: μη – αρώσιμων σημείων και των ορίων του χωραφιού, καθώς επίσης και την περίπτωση επιφανειών αγρανάπαυσης για τις καλλιέργειες που το απαιτούν όπως το καλαμπόκι, ο ηλίανθος κ.α.
 - ii. Τον μηχανικό εξοπλισμό, τα οχήματα και την αντίστοιχη κατανάλωση καυσίμου/ενέργειας που απαιτούν οι καλλιεργειες
 - iii. Την άρδευση και την λιπασματοποίηση των καλλιεργειών
 - iv. Την μεταφορά και την ενσίρωση των ενεργειακών καλλιεργειών και υπολειμμάτων
- II. Την παραγωγή του βοαερίου

Για λόγους απλοποίησης θεωρήθηκε η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο ίση με 55% για όλες τις καλλιέργειες (Schievano et al. 2015). Επιπλέον, παραλήφθηκαν οι τάσεις που θεωρούν ότι η απόδοση του μεθανίου επηρεάζεται από την παρουσία πτητικών οργανικών ενώσεων (Brule' et al. 2013).

- III. Τον σχεδιασμό του συστήματος του θερμοκηπίου, ο οποίος περιελάμβανε:
 - i. Το είδος του θερμοκηπίου θεωρήθηκε ως τύπος στέγης (Aframe), αποτελούμενος από μια σειρά από φράγματα, διαστάσεων 7 m πλάτους και 40 m μήκους, που καλύπτουν έκταση 280 m² και όγκο 840 m³
 - ii. Ως καλλιέργεια, την υδροπονική καλλιέργεια ντομάτας με ετήσια παραγωγή 40 kg/m² και τιμή κιλού 1 €/κιλό
 - iii. Τις θερμικές απαιτήσεις και τους τρόπους κάλυψης είτε με τηλεθέρμανη από την μονάδα CHP, ή εναλλακτικά με την καύση βιομάζας.
 - iv. Τις σωληνώσεις σύνδεσης του θερμοκηπίου με την μονάδα CHP
 - v. Τα λειτουργικά κόστη, τα κόστη εξοπλισμού και αναλώσιμων.

- IV. Τον σχεδιασμό της μονάδας παραγωγής βιοαερίου, ο οποίος περιλαμβάνει:
 - i. Το μέγιστο μέγεθος του αντιδραστήρα βιοαερίου στα 3000 m³, έτσι ώστε να σχεδιαστεί με έναν μόνο αντιδραστήρα και ο υδραυλικός χρόνος παραγωγής τέθηκε 120 ημέρες.
 - ii. Τις θερμικές απαιτήσεις του αναερόβιου χωνευτή, ο οποίος θεωρείτε ότι βρίσκεται κατά το 25% του ύψους του κάτω από το έδαφος και ότι λειτουργεί στην μεσοφιλική φάση (35%)
 - iii. Ως πρώτη ύλη μόνο τις ενεργειακές καλλιέργειες
 - iv. Την ηλεκτρική και θερμική απόδοση της μονάδας CHP
 - v. Το επενδυτικό και λειτουργικό κόστος της μονάδας

- vi. Την τιμολόγηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (230 €/MWh για μονάδες βιοαερίου μικρότερες από 3000kW, and 209 €/MWh για μονάδες βιοαερίου μεγαλύτερες από 3000 kW (N. 4254/2014)

Στη μελέτη, η μονάδα παραγωγής βιοαερίου δεν επωφελήθηκε από πρόσθετα κέρδη από την παροχή θερμότητας στο θερμοκήπιο. Ωστόσο, όταν εξετάστηκε το ολοκληρωμένο σύστημα που περιλαμβάνει τόσο το εργοστάσιο παραγωγής βιοαερίου όσο και το θερμοκήπιο, τα έσοδα από την παραγωγή λαχανικών στο θερμοκήπιο προστέθηκαν στα κέρδη από τις πωλήσεις ηλεκτρικής ενέργειας για να αποτελέσουν το συνολικό κέρδος του συστήμα.

Οι αναλύσεις των οικονομικών στοιχείων του θερμοκηπίου και του συστήματος βιοαερίου (συμπεριλαμβανομένης της καλλιέργειας ενεργειακών καλλιεργειών) πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με την εκτίμηση της Καθαρής Σημερινής Αξίας (Net Present Value: NPV) (Balussou et al., 2014). Η αξιολόγηση των οικονομικών παραμέτρων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα ακόλουθα στάδια: (1) το μέγεθος του εξοπλισμού, (2) την αξιολόγηση του κόστους και των οφελών, (3) τον υπολογισμό της ετήσιας ταμειακής ροής, (4) τον υπολογισμό της NPV (5) τον υπολογισμό της περιόδου αποπληρωμής δηλαδή τον αριθμό των ετών που απαιτούνται για την επίτευξη θετικής NPV.

Τα κύρια ευρήματα της ανάλυσης είναι τα εξής:

- i. Μεταξύ των επτά ενεργειακών καλλιεργειών που αξιολογήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι το Τριτικάλε είναι το φθηνότερο από άποψη κόστους και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (1,4 gr / kWh), ακολουθούμενο από αραβόσιτο (1,6 gr / kW). Στο ελληνικό πλαίσιο, το τριτικάλε ως καλλιέργεια είναι ανθεκτικό στην ξηρασία εμφανίζει ευνοϊκά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με τον αραβόσιτο όσον αφορά τη χρήση του νερού. Ωστόσο, οι ενεργειακές αποδόσεις (εισορές / εκροές) ήταν σχεδόν παρόμοιες και για τις δύο καλλιέργειες.
- ii. Η επιλογή της κατάλληλης ενεργειακής καλλιέργειας θα πρέπει να βασίζεται σε ευνοϊκό συνδυασμό υψηλής απόδοσης βιομάζας, υψηλού δυναμικού βιοαερίου και χαμηλού κόστους παραγωγής.

- iii. Η εισαγωγή θερμοκηπίου στο σχεδιασμό της εγκατάστασης βιοαερίου συμβάλλει ευνοϊκά στην οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος, αυξάνοντας το συνολικό οικονομικό εισόδημα κατά 17-18%.
- iv. Η κυκλική καλλιέργεια αλφάλφα και τριφυλλιού με όσπρια θα μπορούσαν να είναι ενδιαφέρουσες για την αναερόβια χώνευση, ειδικά εάν μπορούν να μειώσουν την χρήση του μέρους της αγρανάπαυσης.
- v. Για να είναι βιώσιμη μια εγκατάσταση μονάδας βιοαερίου που βασίζεται σε ενεργειακές καλλιέργειες και συνδυάζεται με την παραγωγή λαχανικών σε θερμοκήπιο είναι απαραίτητο η γεωργική επιφάνεια να είναι μεγαλύτερη από 500 εκτάρια ή η μονάδα παραγωγής βιοαερίου να είναι μεγαλύτερη από 1000 kW.
- vi. Με δημόσια χρηματοδότηση, η παραγωγή βιοαερίου καθίσταται εφικτή με μικρότερες επιφάνειες γης ή μικρότερα μεγέθη εγκαταστάσεων βιοαερίου. Η χρηματοδότηση των δημόσιων επενδύσεων θα πρέπει να υπερβαίνει το 25%, προκειμένου να είναι οικονομικά επωφελής. Για δημόσια χρηματοδότηση σε ποσοστό 50% της αρχικής επένδυσης, η παραγωγή βιοαερίου καθίσταται εφικτή με εκτάσεις μεγέθους [250 εκτάρια ή [500 kWel (στην περίπτωση του triticale).
- vii. Ο ρυθμός ανάκτησης της θερμικής ενέργειας είναι περίπου 40% (ετήσιος μέσος όρος), έτσι είναι σημαντικό να διερευνηθούν περαιτέρω επιλογές για την ενίσχυση της ανάκτησης θερμότητας από την CHP.

5.2 Το μέλλον του βιοαερίου στην Ευρώπη

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), οι πολιτικοί στόχοι για το κλίμα και την ενέργεια για το 2030 είναι η μείωση κατά 40% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η αύξηση της δυναμικότητας της ανανεώσιμης ενέργειας στο 27% της συνολικής ενέργειας τροφοδοσίας, και 27% αύξηση στην ενεργειακή απόδοση

Το βιοαέριο αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη αυτών των ενεργειακών στόχων λόγω της ευελιξίας του και της αποθήκευσης του ως φορέα ενέργειας, των πολύ διαφορετικών βιολογικών πηγών που μπορούν να

χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του και της ήδη καθιερωμένης εφαρμογής του σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών (θέρμανση, μεταφορά και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας).

Η επιλογή των υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοαερίου έχει συζητηθεί, ιδιαίτερα, σε σχέση με τη χρήση ενεργειακών καλλιεργειών. Η καλλιέργεια ενεργειακών φυτών, ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοενέργειας έχει σημαντικά αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον αλλά και στην οικονομία (Schievano et al. 2009). Για παράδειγμα, από το 2010, το 50% της συνολικής ευρωπαϊκής παραγωγής βιοαερίου παράγονταν στη Γερμανία. Λόγω ενός ελκυστικού συστήματος τιμολογίων, η γερμανική παραγωγή βιοαερίου έχει επεκταθεί σημαντικά. Ωστόσο, αυτή η επέκταση έχει συμβεί με την χρήση υποστρώματος που βασίζεται κυρίως στον αραβόσιτο, γεγονός που προκαλεί ανησυχία λόγω της ενδεχόμενης βλάβης στο περιβάλλον από την εντατική μονοκαλλιέργεια του αραβοσίτου. Τα υποστρώματα ενεργειακών καλλιεργειών αναμένεται όλο και περισσότερο να μην ευνοούνται για τη διαδικασία παραγωγής βιοαερίου σε αναερόβιο χωνευτή και ως εκ τούτου χρειάζονται εναλλακτικές πηγές.

Μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για την δυναμική του βιοαερίου το οποίο προέρχεται από την συλλογή συγκεκριμένων αγροτικών υπολειμμάτων, τα οποία έχει καταγραφεί ότι μπορούν να βελτιώσουν τις αποδόσεις του βιοαερίου όταν συγχωνεύονται.

Στην μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Meyer et al. (2018), εξετάστηκαν τα εξής εναλλακτικά υποστρώματα: υπολείμματα γρασιδιού από μόνιμους και περιστασιακούς βοσκοτόπους, άχυρο από την παραγωγή σιτηρών και κοπριά από βοοειδή, χοίρους και πουλερικά.

Τα συμπεράσματα της έρευνα για το μέλλον της παραγωγής του βιοαερίου στην Ευρώπη είναι τα εξής:

Το ενεργειακό δυναμικό της κοπριάς, του χόρτου και του άχυρου εκτιμάται ότι θα κυμανθεί από $1,2 \times 10^3$ έως $2,3 \times 10^3$ PJ/ έτος, για την Ευρωπαϊκή Ένωση το 2030, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των υπολειμμάτων. Αναλυτικότερα, η Γαλλία, η Γερμανία, η οποία είχε βασιστεί στις ενεργειακές καλλιέργειες για πολλά χρόνια, και

το Ηνωμένο Βασίλειο εκτιμάται ότι έχουν τα υψηλότερα ενεργειακά δυναμικά, που αντιστοιχούν στα 300 - 540 PJ/ έτος , 250 - 400 PJ/ έτος και 90 - 220 PJ/ έτος. Τα παραπάνω ποσοτικά αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι υπάρχει είναι μια σταθερή βάση γεωργικών υπολειμμάτων, κατάλληλων για συγχώνευση, σε όλη την Ευρώπη, και αποτελούν ιδανικές εναλλακτικές λύσεις έναντι των ενεργειακών καλλιεργειών. Η δυναμική των γεωργικών υπολειμμάτων είναι τόσο μεγάλη που ακόμη και στην περίπτωση χαμηλής διαθεσιμότητας, η παραγωγή του βιοαερίου θα διπλασιαστεί. Ακόμη, η συγχώνευση ζωικής κοπριάς με χόρτο και άχυρο είναι μια δυνατότητα που θα μπορούσε να ενισχύσει την αποδοτικότητα και την οικονομική σκοπιμότητα της ευρωπαϊκής παραγωγής βιοαερίου για το 2030. Το μεγάλο δυναμικό βιομάζας δημιουργεί προκλήσεις που σχετίζονται με την διανομή και την επεξεργασία της βιομάζας. Για την αποτελεσματική αξιοποίηση του μεγάλου δυναμικού βιομάζας είναι πιθανόν να χρειάζεται τεχνολογική ανανέωση ή/και ανάπτυξη των μονάδων παραγωγής βιοαερίου. Όμως, παρ'όλες τις παραπάνω προκλήσεις, η παραγωγή ενέργειας από υπολείμματα είναι πιο βιώσιμη, ασφαλής και οικονομικά εφικτή λύση για την αναβάθμιση του τομέα παραγωγής βιοαερίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

5.3 Προοπτικές εξέλιξης της αναερόβιας χώνευσης

Αν και η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης εφαρμόζεται εκατοντάδες χρόνια, η τεχνολογία που χρησιμοποιείται και ο τρόπος που εφαρμόζεται είναι ιδιαίτερα απλός.

6.3.1 Μικροβιολογία της αναερόβιας χώνευσης

Όσον αφορά την μικροβιολογία της αναερόβιας χώνευσης, μέχρι πρότεινος, υπήρχε η θεώρηση ότι δεν υπάρχει δυνατότητα διαχείρισης της μικροβιολογίας που εξελίσσεται κατά την αναερόβια χώνευση όμως με την εξέλιξη της μικροβιολογίας, την τεράστια εξέλιξη στις διατάξεις αλληλουχίας και την χρήση βιοπληροφορικής, η μικροβιολογία του βιοαερίου άρχισε να αποκρυπτογραφείται. Πιο αναλυτικά, επί του παρόντος, αρκετές μελέτες εντοπίζουν νέα μη καλλιεργημένα μικρόβια και αποσαφηνίζουν αρκετές από τις μεταβολικές τους αλληλεπιδράσεις. Η νέα γνώση

για την αναερόβια χώνευση θα οδηγήσει σε εξειδικευμένα συστήματα προηγμένης διαχείρισης των μικροβιακών πόρων και σε παρεμβάσεις στη μικροβιακή σύνθεση τα οποία θα είναι δυνατόν να προσαρμόζονται στις συγκεκριμένες ανάγκες κάθε διαδικασίας. Προβλέπεται λοιπόν, ότι σύντομα στον τομέα του βιοαερίου θα εφαρμοστεί προηγμένη διαχείριση των μικροβιακών πόρων με αποτέλεσμα πιο αποτελεσματική διαδικασία αναερόβιας χώνευσης της βιομάζας. Επιπλέον, δεν μπορεί να αμφισβητηθεί ότι η μικροβιολογία θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη διάγνωση και την παρακολούθηση της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης μέσω της εκμετάλλευσης συγκεκριμένων βιοδεικτών.

5.3.1 Αυτοματοποίηση της αναερόβιας χώνευσης

Αναφορικά με την αυτοματοποίηση των μονάδων βιοαερίου υπάρχει σημαντικό κενό και οι διαδικασίες πραγματοποιούνται με βάση τις εμπειρικές πρακτικές των ανθρώπων που διαχειρίζονται την μονάδα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μερικές φορές οι χωνευτές να υπερχειλίζουν ή να υποτροφοδοτούνται, συνθήκες που μειώνουν την απόδοση της διεργασίας σε μεθάνιο. Ως εκ τούτου, είναι σημαντική η ανάπτυξη τεχνολογιών για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των μονάδων. Ήδη, αρκετοί αισθητήρες παρακολούθησης έχουν αναδυθεί και προβλέπεται ότι η σύνδεσή τους με τα συστήματα ελέγχου και τους αλγόριθμους, θα κυριαρχήσει στη διαδικασία λήψης αποφάσεων των εγκαταστάσεων βιοαερίου.

Για παράδειγμα οι Ros et al. (2017) ανέπτυξαν μία εφαρμογή για τον αυτοματοποιημένο έλεγχο της τροφοδοσίας ανερόβιο χωνευτή αποβλήτων οινοποιείων.

Η μελέτη τους αφορά τη βελτιστοποίηση της αναερόβιας χώνευσης των αποβλήτων οινοποιείων λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά του ρυθμού παραγωγής βιοαερίου μεταξύ δύο διαδοχικών τροφοδοσιών του αντιδραστήρα. Παρακολουθήθηκαν οι διεργασίες σε διαφορετικούς χρόνους κατακράτησης υδραυλικού συστήματος (23 και 40 ημέρες) και έγινε σύγκριση των αντίστοιχων παραγόμενων ποσοτήτων βιοαερίου (0,386 και 0,378 m³ / kg COD). Στην συνέχεια,

μετά από 11 έως 14 ώρες μειώθηκε ο ρυθμός παραγωγής του βιοαερίου και στις δύο διαδικασίες. Οι 11 – 14 ώρες αντιστοιχούν στην απαραίτητη περίοδο έτσι ώστε το βιοαποικοδομήσιμο μέρος να καταναλώνεται εύκολα και το COD να υδρολύεται εύκολα. Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή βιοαερίου, δημιουργήθηκε ένα σύστημα ικανό να αυξάνει τη συχνότητα τροφοδοσίας. Το σύστημα ενεργοποίησε την αντλία τροφοδοσίας όταν μειώθηκε ο ρυθμός παραγωγής βιοαερίου (κάτω από $0,4 \text{ m}^3 \text{ βιοαέριο} / (\text{m}^3 \text{ αντιδραστήρα})$). Συνεπώς, ο χρόνος υδραυλικής κατακράτησης μειώθηκε σε 21 ημέρες και ο ρυθμός οργανικής φόρτισης αυξήθηκε από 3,2 σε $6,2 \text{ kg COD} / (\text{m}^3 \text{ αντιδραστήρα})$ χωρίς προβλήματα σταθερότητας και ο ρυθμός παραγωγής του βιοαερίου αυξήθηκε από 1,1 σε $2,8 \text{ m}^3 \text{ βιοαέριο} / (\text{m}^3 \text{ αντιδραστήρα})$. Επιπλέον, αυτές οι συνθήκες στάθηκαν ευνοϊκές στην ανάπτυξη μικροοργανισμών που εμπλέκονται στην αποικοδόμηση του διαλυτού κλάσματος COD και παρατηρήθηκαν ταχύτερες κινητικές στην κατάσταση αυτή. Τέλος, εφαρμόστηκαν δύο κινητικά μοντέλα (πρώτης τάξης και σταδιακής διάχυσης) σε χειροκίνητες και αυτόματα τροφοδοτούμενες διαδικασίες, προκειμένου να κατανοηθεί πως ο χρόνος κατακράτησης και ο αυτόματος έλεγχος επηρέασαν την ταχύτητα αποικοδόμησης των διαφόρων τύπων ενώσεων και επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την προκαταρκτική κινητική μελέτη (Ros et al. 2017).

Επίσης η αναερόβια χώνευση είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε διαταραχές της διαδικασίας. Για παράδειγμα, η αναερόβια χώνευση είναι δυνατόν να ανασταλεί από ενδιάμεσα προϊόντα, όπως τα VFA, την αμμωνία και το υδρογόνο που παράγονται κατά την χώνευση (Chen et al., 2008) και επομένως είναι επωφελής η χρήση ηλεκτρονικών τεχνικών παρακολούθησης και ελέγχου των διαδικασιών και των παραμέτρων για την εξασφάλιση της ομαλής ανάπτυξης των μεθανογόνων μικροοργανισμών και την αποτελεσματική λειτουργία του αντιδραστήρα. Μια σειρά ηλεκτροχημικών, χρωματογραφικών και φασματοσκοπικών συσκευών μπορεί να αναπτυχθεί για την on-line παρακολούθηση και τον έλεγχο της αναερόβιας χώνευσης. Ωστόσο, οι εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας αναερόβιας χώνευσης δεν μπορούν να υποστηρίξουν οικονομικά το κόστος των οργάνων για να αυτοματοποιήσουν τη λειτουργία της εγκατάστασης, έτσι μία πιθανή λύση είναι η

συγχώνευση μικρών μονάδων σε μια μεγαλύτερη η οποία θα μπορούσε να ανταποκριθεί στο κόστος των αυτοποιημένων συστημάτων ελέγχου (Venkataramana et al. 2015)

5.4 Ανακεφαλαίωση

Τόσο στην Ελλάδα όσο και στην Ευρώπη προωθείται η παραγωγή βιοαερίου από αγρο-κτηνοτροφικά υπολείμματα, σε αντίθεση με την μέχρι σήμερα τάση για ενεργειακές καλλιέργειες. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση μονάδας βιοαερίου, κρίσιμο ρόλο στην απόδοση της εγκατάστασης κατέχει η αναερόβια χώνευση η οποία είναι μια διεργασία που εξαρτάται πρωτίστως από την ανάπτυξη των κατάλληλων μικροβιακών κοινωνιών. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η σταδιακή αυτοματοποίηση των εγκαταστάσεων αναερόβιας χώνευσης, για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των διεργασιών με σκοπό την συνεχή και σταθερή λειτουργία, με μέγιστο βαθμό απόδοσης βιοαερίου.

Κεφάλαιο 6^ο: Συμπεράσματα

Από την ανάλυση που προηγήθηκε σχετικά με την παραγωγή και αξιοποίηση του βιοαερίου προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Το βιοαέριο αποτελεί μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας η οποία είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί με πολλαπλούς τρόπους και να καλύψει είτε μεγάλες ενεργειακές ανάγκες όπως ένα μέρος των ενεργειακών αναγκών μιας πόλης, μιας βιομηχανίας ή μικρότερες ενεργειακές ανάγκες όπως αυτές ενός νοικοκυρίου.

Ανάλογα με την γεωγραφική θέση, την παραγωγή βιομάζας και τις ενεργειακές απαιτήσεις μιας χώρας επιλέγονται οι κατάλληλοι τρόποι αξιοποίησης της βιομάζας και του παραγόμενου βιοαερίου, σε μονάδες μικρής κλίμακας (οικιακής), μεγάλης κλίμακας ή και συνδυασμένων μονάδων με άλλες λειτουργίες.

Τέλος, τόσο στην Ελλάδα όσο και στην Ευρώπη, οι πόσοτητες των αγρο – κτηνοτροφικών αποβλήτων που παράγονται είναι πολύ μεγάλες, αποτελώντας ένα σημαντικό ενεργειακό δυναμικό και μια αστείρευτη πηγή παραγωγής βιοαερίου και ενέργειας. Είναι σημαντικό λοιπόν να στραφούν οι προσπάθειες στην αξιοποίηση της καθημερινά παραγόμενης βιομάζας από τον γεωργικό και κτηνοτροφικό τομέα και ταυτόχρονα να αποκλίνουν από την εντατικοποίηση και την μονοκαλλιέργεια ενεργειακών φυτών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση

The European Parliament, Decision No 406/2009/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the Effort of Member States to Reduce Their Greenhouse Gas Emissions to Meet the Community's Greenhouse Gas Emission Reduction Commitments up to 2020, 2009.

European Commission, Press release- Energy Union: secure, sustainable, competitive, affordable energy for every European, Eur. Comm. (2015).

J.B. Holm-Nielsen, T. Al Seadi, P. Oleskowicz-Popiel, The future of anaerobic digestion and biogas utilization, *BioresourceTechnology* 100 (2009) 5478e5484.

A. Schievano, G. D'Imporzano, F. Adani, Substituting energy crops with organic wastes and agro-industrial residues for biogas production, *J. Environ. Management* 90 (8) (June 2009) 2537e2541.

A.K.P. Meyer a, *, E.A. Ehimen b, J.B. Holm-Nielsen a (2018) Future European biogas: Animal manure, straw and grass potentials for a sustainable European biogas production. *Biomass and Bioenergy* 111 (2018) 154-164

Cinzia Da Ros, Federico Micolucci, Marco Gottardo, Cristina Cavinato, David Bolzonella, Paolo Pavan (2017). Development and application of an automatic feeding control to manage anaerobic co-digestion of winery wastes. *Journal of Cleaner Production* Volume 161, Pages 75-83.

Y. Chen, J.J. Cheng, K.S. Creamer (2008) Inhibition of anaerobic digestion process: a review *Bioresour. Technol.*, 99, pp. 4044-4064

Duc Nguyen, Venkataramana Gadhamshetty, Saoharit Nitayavardhana, Samir Kumar Khanal (2015) Automatic process control in anaerobic digestion technology: A critical review. *Bioresource Technology*. Volume 193, Pages 513-522

R.M. Kapoor, V.K. Vijay, (2013). Evaluation of Existing Low Cost Gas Bottling Systems for Vehicles Use Adaption in Developing Economies,

International Energy Agency, IEA Bioenergy Task 37 Country Reports Summary 2015, 2016. http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2015/01/IEA-Bioenergy-Task-37-Country-Report-Summary-2014_Final.pdf.

Y. Vogeli, C. Riu, A. Gallardo, S. Diener, C. Zurbrügg, Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries, 2014, <https://doi.org/10.13140/2.1.2663.1045>.

International Renewable Energy Agency, Renewable Capacity Statistics 2016, 2017.

United States Environmental Protection Agency (US EPA), AgStar Program Biogas Recovery in the Agriculture Sector, 2017 (accessed May 1, 2018), <https://www.epa.gov/agstar>.

United States Environmental Protection Agency (US EPA), Landfill Methane Outreach Program: Basic Information, 2017 (accessed May 1, 2018), <https://www.epa.gov/agstar>.

American Biogas Council, Operational Biogas Systems in the U.S, 2017 (accessed July 1, 2018), <https://www.americanbiogascouncil.org/>.

Eurostat, European Statistics, 2017. <http://ec.europa.eu/eurostat> (accessed July 1, 2018).

F. Van Foreest, Perspectives for Biogas in Europe, 2012. <http://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2012/12/NG-70.pdf>.

European Biogas Association, Annual Statistical Report, 2016.

Nicolae Scarlat*, Jean-François Dallemand, Fernando Fahl (2018) Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy* 129, 457-472

Deng L, Liu Y, Zheng D, Wang L, Pu X, Song L, Long Y. Application and development of biogas technology for the treatment of waste in China. *Renew Sustain Energy Rev.* 2017;70:845–51

Zhang B, Chen B. Sustainability accounting of a household biogas project based on emergy. *Appl Energ.* 2016;194:819–31.

Ministry of Agriculture. Livestock industry development planning (2010-2020): Beijing: Science and Technology Education Department of Ministry of Agriculture, 2007 (in Chinese).

Zhang PD, Yang YL, Tian YS, Yang XT, Zheng YH, Wang LS. Bioenergy industries Development in China: dilemma and solution. *Renew Sustain Energy Rev.* 2009;13(9):2571–9.

Yang J, Chen B. Extended exergy-based sustainability accounting of a household biogas project in rural China. *Energy Policy.* 2014;68(2):264–72.

B. Chen et al., Biogas Systems in China, DOI 10.1007/978-3-662-55498-2_4. Springer-Verlag GmbH Germany 2017

Abbasi T., Tauseef S.M., Abbasi S.A. (2012) Biogas Energy. SpringerBriefs in Environmental Science. Springer.

Ravina, M., Genon, G., 2015. Global and local emissions of a biogas plant considering the production of biomethane as an alternative end-use solution. *J. Cleaner Prod.* 102, 115–126.

Lantz, M., 2012. The economic performance of combined heat and power from biogas produced from manure in Sweden – A comparison of different CHP technologies. *Appl. Energy* 98, 502–511

Djatkov, D., Effenberger, M., Martinov, M., 2014. Method for assessing and improving the efficiency of agricultural biogas plants based on fuzzy logic and expert systems. *Appl. Energy* 134, 163–175.

EUR-Lex. Access to European Union Law; 2009. Available: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=URISERV%3Aen0009>>

Abdeshahian P, et al. Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;60:714–23.

Trendewicz, A.A., Braun, R.J., 2013. Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based combined heat and power systems for biogas utilization at wastewater treatment facilities. *J. Power Sources* 233, 380–393

Wongchanapai, S., Iwai, H., Saito, M., Yoshida, H., 2013. Performance evaluation of a direct-biogas solid oxide fuel cell-micro gas turbine (SOFC-MGT) hybrid combined heat and power (CHP) system. *J. Power Sources* 223, 9–17

Jahangiri H, et al. A review of advanced catalyst development for Fischer-Tropsch synthesis of hydrocarbons from biomass derived syn-gas. *Catal Sci Technol* 2014;4(8):2210–29.

US Environmental Protection Agency. Life cycle assessment: principles and practice; 2006.

Imran Ullah Khana,b,c, Mohd Hafiz Dzarfan Othmanb,□, Haslenda Hashima,□, Takeshi Matsuura, A.F. Ismailb, M. Rezaei-DashtArzhandib, I. Wan Azelee (2017) Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilization and storage. *Energy Conversion and Management* 150 (2017) 277–294

Cozma P, Ghinea C. Environmental impact assessment of high pressure water scrubbing biogas upgrading technology. *CLEAN-Soil, Air Water* 2013;41(9):917–27.

Chen X, Vinh-Thang H, Ramirez AA, Rodrigue D, Kaliaguine S. Membrane gas separation technologies for biogas upgrading. *RSC Adv* 2015;5(31):24399–448. <http://dx.doi.org/10.1039/C5RA00666J>.

Cozma P, Wukovi W, Friedl A, Gavrilescu M. Modeling and simulation of high pressure water scrubbing technology applied for biogas upgrading. *Clean Technol Environ Policy* 2014;17:373–91. <http://dx.doi.org/10.1007/s10098-014-0787-7>.

Eze J, Agbo K. Maximizing the potentials of biogas through upgrading. *Am J Sci Ind Res* 2010;1(3):604–9.

Tock L, Gassner M, Maréchal F. Thermochemical production of liquid fuels from biomass: thermo-economic modeling, process design and process integration analysis. *Biomass Bioenerg* 2010;34:1838–54.

Palma V, Barba D, Ciambelli P. Biogas purification by selective partial oxidation of H₂S on V₂O₅-CeO₂ catalysts. *Brazilian J Chem Eng* 2013;21:5–6.

Huang H, Chang S, Dorchak T. Method to regenerate ammonia for the capture of carbon dioxide. *Energy Fuels* 2002;16(4):904–10.

Jiang LY, Chung TS, Kulprathipanja S. An investigation to revitalize the separation performance of hollow fibers with a thin mixed matrix composite skin for gas separation. *J Memb Sci* 2006;276:113–25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2005.09.041>

Baker R, Lokhandwala K. Natural gas processing with membranes: an overview. *Ind Eng Chem Res* 2008;47(7):2109–21.

Basu S, Khan AL, Cano-Odena A, Liu C, Vankelecom IFJ. Membrane-based technologies for biogas separations. *Chem Soc Rev* 2010;39:750–68. <http://dx.doi.org/10.1039/b817050a>.

Andriani D, Wresta A. A review on optimization production and upgrading biogas through CO₂ removal using various techniques. *Appl Biochem Biotechnol* 2014;172(4):1909–28.

Hullu J, Waassen J, Van Meel P. Comparing different biogas upgrading techniques. *Eindhoven Univ Technol* 2008;56:56–100.

Krich K, Augenstein D, Batmale J, Benemann J, Rutledge B, Salour D. Chapter 3: Upgrading Dairy Biogas to Biomethane and Other Fuels. *Biomethane from Dairy Waste A Sourceb Prod Use Renew Nat Gas Calif Clear Concepts* 2005;1:21–7.

Sun Q, Li H, Yan J, Liu L, Yu Z, Yu X. Selection of appropriate biogas upgrading technology – a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;51:521–32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.029>.

Kougias PG, Treu L, Benavente DP, Boe K, Campanaro S, Angelidaki I. Ex-situ biogas upgrading and enhancement in different reactor systems. *Biores Technol* 2017;225:429–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.124>.

Grimsby LK, Rajabu HM, Treiber MU. Multiple biomass fuels and improved cook stoves from Tanzania assessed with the Water Boiling Test. *Sustain Energy Technol Assess* 2016;14:63–73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2016.01.004>

Biogas from Waste and Renewable Resources. 2nd Ed., D. Deublein and A. Steinhauser Copyright © 2011 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN: 978-3-527-32798-0

European Commission (EC). Regulation No. 1774/2002 of the European Parliament and of the Council of 3 October 2002 laying down health rules concerning animal by products not intended for human consumption. *Eur Comm Off J*, L 273 10/10/2002; 2002. p. 1–95.

Beaudin M, Zareipour H, Schellenberg A, Rosehart W. Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: an updated review. *Energy Sustain Dev* 2010;14:302–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2010.09.007>.

Holm-Nielsen JB, Al Seadi TOP. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Biores Technol* 2009;100 (22):5478–84.

Muradov N, Smith F, T-Raissi A. Hydrogen production by catalytic processing of renewable methane-rich gases. *Int J Hydrogen Energy* 2008;33:2023–35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.02.026>.

Effendi A, Hellgardt K, Zhang ZG, Yoshida T. Optimising H₂ production from model biogas via combined steam reforming and CO shift reactions. *Fuel* 2005;84:869–74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2004.12.011>.

Hahn H, Hartmann K, Wachendorf M. Comparative life cycle assessment of biogas plant configurations for a demand oriented biogas supply for flexible power generation. *Biores Technol* 2015;179:348–58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.007>.

Svensson M. Biomethane standards: Gas quality standardisation of biomethane, going from national to international level. *Eur Work Biomethane, Brussels Green Gas Grids*; 2014.

Farzaneh-Gord M, Branch S. Real and ideal gas thermodynamic analysis of single reservoir filling process of natural gas vehicle cylinders. *J Theor Appl Mech* 2011;41(12):21–36.

Uusitalo V, Havukainen J, Manninen K, Hohn J, Lehtonen E, Rasi S, et al. Carbon footprint of selected biomass to biogas production chains and GHG reduction potential in transportation use. *Renew Energy* 2014;66:90–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.004>.

Subramanian KA, Mathad VC, Vijay VK, Subbarao PMV. Comparative evaluation of emission and fuel economy of an automotive spark ignition vehicle fuelled with methane enriched biogas and CNG using chassis dynamometer. *Appl Energy* 2013;105:17–29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.011>.

Lim C, Kim D, Song C, Kim J, Han J, Cha JS. Performance and emission characteristics of a vehicle fueled with enriched biogas and natural gases. *Appl Energy* 2015;139:17–29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.084>.

Patterson T, Esteves S, Dinsdale R, Guwy A. An evaluation of the policy and techno-economic factors affecting the potential for biogas upgrading for transport fuel use in the UK. *Energy Policy* 2011;39:1806–16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.017>

Angelidaki I (2002) *Environmental Biotechnology* 12133. Environment and Resources DTU, Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby, Denmark

Burton T (2009) *A Review of the Potential of Marine Algae as a Source of Biofuels in Ireland*. Sustainable Energy Ireland, Dublin, Ireland

Kuglarz M and Mrowiec B (2009) *Co-digestion of Municipal Biowaste and Sewage Sludge for Biogas Production*. Available from: <http://www2.lwr.kth.se/Forskningsprojekt/Polishproject/rep16/KuglarzMrowiec.pdf> [Accessed 25 April 2018].

Rulkens W (2008) Sewage Sludge as a biomass resource for the production of energy: overview and assessment of the various options, *Energy and Fuels*, 22, 9–15.

Wellinger A (2009) Algal biomass. Does it save the World? Short Reflections. IEA Bioenergy Task 37 Publication. Available from: http://www.iea-biogas.net/_content/publications/publications.php [Accessed 15 March 2018]

Zhang R, El-Mashad H M, Hartman K, Wang F, Liu G, Choate C and Gamble P (2006) Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion, *Bioresource Technology*, 98, 929–935. Available from: <http://www.zjubiolab.zju.edu.cn/wumin/userfiles/lab-paper/000292-20101226120531.pdf> [Accessed 12 May 2018].

Rutz D, Janssen R, Hoffstede U, Beil M, Hahn H, Kulisic B, Juric' Z, Kruhek M, 50 The biogas handbook © Woodhead Publishing Limited, 2013 Ribic B, Haider P, Gostomska A, Nogueira M A, Martins A S, Martins M, do Ce' u Albuquerque M, Dzene I, Niklass M, Gubernatorova I, Schinnerl D, Ruszel M and Pawlak P (2011) Organic waste for biogas production in urban areas. Proceedings of 19th European Biomass Conference and Exhibition, Berlin, Germany, 2125–2131, DOI: 10.5071/19thEUBCE2011-VP3.4.27.

Favoino E (2002) Drivers for separate collection in the EU, optimization and cost assessment of high capture schemes. Proceedings of EC Conference on Biological Treatment of Biodegradable Waste, Brussels, Belgium

Murphy J, Braun R, Weiland P and Wellinger A (2011) Biogas from Crop Digestion. IEA Bioenergy Task 37 publication. Available from: http://www.iea-biogas.net/_download/publi-task37/Update_Energy_crop_2011.pdf [Accessed 10 February 2018]

Steffen R, Szolar O and Braun R (1998) Feedstocks for Anaerobic Digestion. Available from: http://www.adnett.org/dl_feedstocks.pdf [Accessed 10 February 2018].

World Energy Council (2010) Survey of Energy Resources, Executive Summary. WEC, London, UK.