



# ΑΣΚΗΣΕΙΣ: ΚΑΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Αλεξάνδρα Μπαρμπατζά



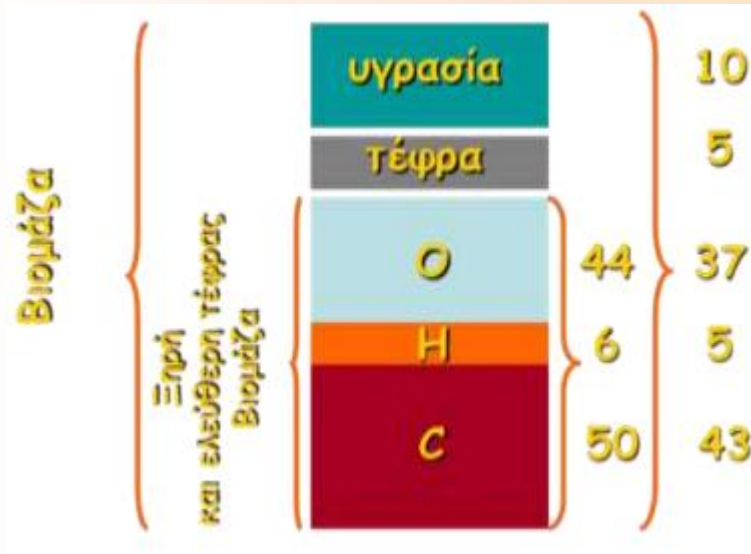
# Καύση Βιομάζας 1

## -Δεδομένα

Να υπολογισθεί η ΑΘΔ και η ΚΘΔ της τυπικής βιομάζας.

## -Λύση

### -Τυπική Σύσταση Βιομάζας



### -Η τυπική βιομάζα περιέχει:

- 10 % κ.β. υγρασία
- 5 % κ.β. τέφρα
- 85 % κ.β. ξηρή και ελεύθερη τέφρας βιομάζα

### -Η ξηρή και ελεύθερη τέφρας βιομάζα τυπικά περιέχει:

- 50 % κ.β. άνθρακα
- 44 % κ.β. οξυγόνο
- 6 % κ.β. υδρογόνο

-Η Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (ΑΘΔ) της ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$ΑΘΔ = 33890,4 \times C + 144180,6 \times (H - O/8) \text{ kJ/kg}$$



# Καύση Βιομάζας 1

Συνεπώς:

$$A\Theta\Delta = 33.890,4 \times 0,5 + 144.180,6 \times (0,06 - 0,44/8) = 17.666 \text{ kJ/kg ξηρής βιομάζας}$$

Όμως η τυπική βιομάζα περιέχει κατά 85% ξηρή και ελεύθερη τέφρας βιομάζα.

**-Συνεπώς η AΘΔ της τυπικής βιομάζας θα ισούται με:**

$$0,85 \times 17.666 \text{ kJ/kg} = 15.016 \text{ kJ/kg}$$

**-Η Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη (ΚΘΔ) της ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας υπολογίζεται από την AΘΔ αφαιρώντας τη λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης του ατμού που παράγεται από την καύση (ο ατμός όταν υγροποιείται αποδίδει θερμότητα 40,7 kJ/mole ατμού).**

Το 1 kg βιομάζας (υγρή) περιέχει:

$$10 \% \text{ υγρασία ή } 100 \text{ γρ νερού ή } 100/18 = 5,5 \text{ mol νερού (18 το Μοριακό Βάρος του νερού)}$$

και

850 γρ ξ. βιομάζας x 6% κ.β. υδρογόνο = 51 γρ ατομικού υδρογόνου ή  $51/2 = 25,5 \text{ mol H}_2$  (όπου 1 το Ατομικό Βάρος του Υδρογόνου), τα οποία κατά την καύση τους ( $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$ ) παράγουν 25,5 mol νερού.



# Καύση Βιομάζας 1

-Τα συνολικά mol ατμού που προκύπτουν μετά την καύση 1 kg βιομάζας είναι:

- 5,5 mol από την εξάτμιση της υγρασίας της βιομάζας
- 25,5 mol από την καύση του υδρογόνου της ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας

Δηλαδή συνολικά  $5,5 + 25,5 = 31$  mol ατμού/kg, με συνολική λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης:

$$31 \text{ mol/kg} \times 40,7 \text{ kJ/mol} = 1.262 \text{ KJ/kg.}$$

**-Συνεπώς, η ΚΘΔ της συγκεκριμένης βιομάζας είναι:**

$$\text{ΚΘΔ} = 15.016 \text{ kJ/kg} - 1.262 \text{ KJ/kg} = 13.754 \text{ kJ/kg}$$



# Καύση Βιομάζας 2

## -Δεδομένα

Να υπολογισθεί η θερμότητα σχηματισμού του οργανικού μέρους (της ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας) της τυπικής βιομάζας. Δίνονται η ενθαλπία σχηματισμού του διοξειδίου του άνθρακα και του νερού 393,5 και 285,8 kJ/mol αντίστοιχα.

## -Λύση

Από το προηγούμενο παράδειγμα υπολογίσαμε ότι η ΑΘΔ της ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας είναι: 17.666 kJ/kg ξηρής βιομάζας.

Η ΑΘΔ είναι ίση με τη θερμότητα που εκλύεται κατά την πλήρη καύση 1 kg ξηρής βιομάζας.

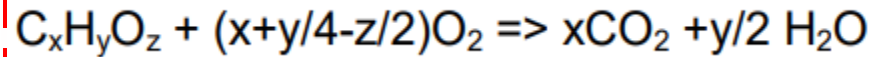
1 kg ξ. βιομάζας περιέχει:

- 500 gr C ή 41,6 mol C (γιατί 12 το Ατομικό Βάρος του Άνθρακα)
- 440 gr O ή 27,5 mol O (γιατί 16 το Ατομικό Βάρος του Οξυγόνου)
- 60 gr H ή 60 mol H (γιατί 1 το Ατομικό Βάρος του Υδρογόνου)



# Καύση Βιομάζας 2

-Η τέλεια (πλήρη) καύση της βιομάζας (αλλά και των ορυκτών στερεών καυσίμων), οδηγεί αποκλειστικά στην παραγωγή CO<sub>2</sub> (από την πλήρη καύση του στοιχειακού άνθρακα) και H<sub>2</sub>O (από την πλήρη καύση του στοιχειακού υδρογόνου)



όπου x, y, z η αναλογία moles στον ενδεικτικό μοριακό τύπο C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>O<sub>z</sub> της βιομάζας.

Η θερμότητα που εκλύεται από την παραπάνω αντίδραση είναι:

$$17.666 = 41,6 \Delta H_{CO_2} + 30 \Delta H_{H_2O} - \Delta H_{\xi\eta\rho\eta\varsigma\_βιομάζας}$$

$$\text{και } \Delta H_{\xi\eta\rho\eta\varsigma\_βιομάζας} = 41,6 * 393,5 + 30 * 285,8 - 17.666 = 7.277,6 \text{ kJ/kg.}$$



# Καύση Βιομάζας 3

## -Δεδομένα

Σε καυστήρα ρευστοστερεάς κλίνης εισέρχονται υπολείμματα κοπής ξύλου. Η πρώτη ύλη περιέχει 72% ξηρή και ελεύθερης τέφρας βιομάζας με σύσταση:

C 36%

H 4%

O 32%

,25% υγρασία και 3% στάχτη. Τα υπολείμματα εισέρχονται στον καυστήρα με ρυθμό 1 kg/s. Τα απαέρια εξέρχονται σε θερμοκρασία 150 °C και περιέχουν 1% CO. Θεωρώντας 25 % περίσσεια αέρα, στην τροφοδοσία, να υπολογιστεί η ωφέλιμη θερμότητα και η απόδοση του καυστήρα ως προς την ΑΘΔ και την ΚΘΔ της τροφοδοσίας.

## -Λύση

Παραγόμενη θερμότητα κατά την καύση= Ενθαλπία των προϊόντων της αντίδρασης - Ενθαλπία των αντιδρώντων (βιομάζα και αέρας)



# Καύση Βιομάζας 3

-Για το λόγο αυτό αρχικά πρέπει να υπολογιστεί η ενθαλπία σχηματισμού της βιομάζας από την Α.Θ.Δ. της:

$$ΑΘΔ = 33.890,4 \times C + 144.180,6 \times (H - (O/8)) \text{ kJ/kg}$$

Από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι θερμογόνος δύναμη καλείται η θερμική ενέργεια που εκλύεται κατά την καύση 1 kg καυσίμου (αέρια: 1 m<sup>3</sup>) σε συγκεκριμένες συνθήκες.

-Θα πρέπει πρώτα να ανάγουμε την ξηρή και ελεύθερης τέφρας βιομάζα στα 1000gr:

$$C: 36 \times 1000/720 = 50,0 \%$$

$$H: 4 \times 1000/720 = 5,5 \%$$

$$O: 32 \times 1000/720 = 44,4 \% \text{ κ.β.}$$

-Οπότε η θερμογόνος δύναμη της ξηρής πρώτης ύλης είναι:

$$33.890,4 \times 0,5 + 144.180,6 \times (0,055 - 0,444/8) = 16.873 \text{ kJ/kg}$$

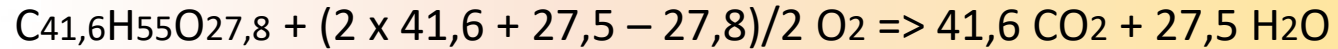
-1 kg ξηρής βιομάζας περιέχει:

- 500 gr C ή 41,6 mol C
- 55 gr H ή 55 mol H και
- 444 gr O ή 27,8 mol O



# Καύση Βιομάζας 3

-Οπότε η στοιχειομετρία της αντίδρασης πλήρους καύσης, στη βάση του 1 kg ξηρής βιομάζας, είναι:



και το ισοζύγιο ενέργειας είναι:

$$16.873 = 41,6 \times 393,5 + 27,5 \times 285,8 - \Delta H_{\text{βιομάζας}}$$

$$\text{-Οπότε: } \Delta H_{\text{βιομάζας}} = 41,6 \times 393,5 + 27,5 \times 285,8 - 16.873 = 7.356,1 \text{ kJ/kg}$$

Για να υπολογιστεί η σύσταση των αερίων, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η περίσσεια αέρα που χρησιμοποιείται.

-Ο στοιχειομετρικός αέρας που απαιτείται για πλήρη καύση, στη βάση 1 sec (1 kg τροφοδοσίας ή 720 gr ξηρής βιομάζας), υπολογίζεται ως εξής:

-Τα 720gr ξηρής βιομάζας περιέχουν:

- 360 gr C ή 30 mol C
- 40 gr H ή 40 mol H και
- 320 gr O ή 20 mol O



# Καύση Βιομάζας 3

-Οπότε, η στοιχειομετρία της πλήρους καύσης είναι:



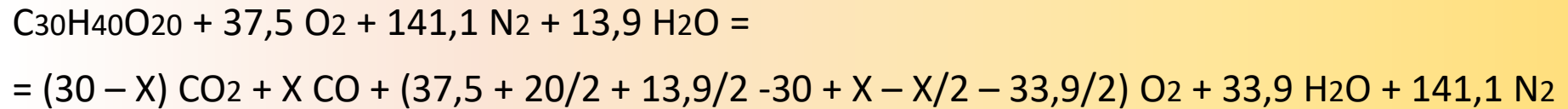
και το θεωρητικό  $O_2$  που απαιτείται είναι  $30 \text{ mol / sec}$ .

**Στην πράξη η καύση δεν είναι τέλεια (σχηματίζονται και μικρές ποσότητες CO) ακόμη και αν χρησιμοποιηθεί περίσσεια οξυγόνου, το οποίο δεν τροφοδοτείται στον καυστήρα καθαρό αλλά ως αέρας. Έτσι τα προϊόντα της καύσης (τα απαέρια του καυστήρα), εκτός από  $CO_2$ ,  $H_2O$  και CO, περιέχουν το οξυγόνο που δεν αντέδρασε (την περίσσεια οξυγόνου) και το  $N_2$  του αέρα που χρησιμοποιήθηκε για την καύση.**



# Καύση Βιομάζας 3

-Με βάση τα παραπάνω, η αντίδραση που λαμβάνει χώρα στον καυστήρα (στη βάση 1 sec) είναι:



γιατί 25% υγρασία και άρα 250 γρ H<sub>2</sub>O ή 250/18 = 13,9 mol H<sub>2</sub>O και

επίσης 25% περίσσεια αέρα άρα 30 mol + (30\*0.25) = 37,5 mol O<sub>2</sub> τα οποία συνοδεύονται από 37,5 x 79/21 = 141,1 mol N<sub>2</sub>. (Ο αέρας είναι περίπου 79% άζωτο και 21% οξυγόνο κατ' όγκο)

-Οπότε τα συνολικά mol στην έξοδο είναι:

$$30 - X + X + 7,5 + X/2 + 33,9 + 141,1 = 100\%$$

$$212,5 + X/2 \text{ το } 1\% \text{ των οποίων είναι CO, δηλαδή: } X = 0,01 (212,5 + X/2) \Rightarrow X = 2,14$$

-Οπότε η έξοδος αποτελείται από 27,86 mol CO<sub>2</sub>, 2,14 mol CO, 8,57 mol O<sub>2</sub>, 33,9 mol H<sub>2</sub>O και 141,1 mol N<sub>2</sub>.



# Καύση Βιομάζας 3

-Η θερμότητα που παράγεται από την αντίδραση (στη βάση 1 sec και σε πρότυπες συνθήκες) είναι:

$$27,86 \times \Delta H_{CO_2} + 2,14 \times \Delta H_{CO} + 20 \times \Delta H_{H_2O} - \Delta H_{\text{βιομάζας}} =$$

$$27,86 \times 393,5 + 2,14 \times 110,5 + 20 \times 285,8 - 5.296,3 = 11.619,0 \text{ kJ/kg βιομάζας στην είσοδο.}$$

όπου:

$$5.296,3 = 7.356,1 \times (720/1000) \text{ kJ/kg}$$

γιατί η ενθαλπία σχηματισμού των συνήθων προϊόντων της καύσης (στους 25°C, 298 K) είναι:

$$\Delta H_{CO_2}^{\circ} = 393,5 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{CO}^{\circ} = 110,5 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{H_2O,l}^{\circ} = 285,8 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{H_2O,g}^{\circ} = 241,8 \text{ kJ/mol}$$

ενώ για τα στοιχεία O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> και N<sub>2</sub> είναι μηδέν.



# Καύση Βιομάζας 3

Η αισθητή θερμότητα μίας ουσίας (στερεής πχ βιομάζα ή τέφρα, υγρής π.χ. ενός υγρού καυσίμου ή του νερού, ή αέριας π.χ. των συστατικών του αερίου μίγματος των απαερίων της καύσης ή του αέρα που τροφοδοτείται στον καυστήρα) θεωρείται μηδέν στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ σε οποιαδήποτε άλλη θερμοκρασία δίνεται από τη σχέση:

$$S_{th}^i = \int_{298}^T c_p^i dT$$

όπου  $c_p^i$  η θερμοχωρητικότητα της ουσίας  $i$ , η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και για τα βασικά συστατικά καύσης της βιομάζας είναι:

$$C_p^{O_2} = 0,035 + 1,08 \times 10^{-6} T - 785,3/T^2 \text{ kJ/degmol}$$

$$C_p^{N_2} = 0,027 + 4,18 \times 10^{-6} T \text{ kJ/degmol}$$

$$C_p^{H_2} = 0,028 + 3,39 \times 10^{-6} T \text{ kJ/degmol}$$

$$C_p^{CO_2} = 0,043 + 1,15 \times 10^{-5} - 818,0/T^2 \text{ kJ/degmol}$$

$$C_p^{CO} = 0,028 + 5,02 \times 10^{-6} T \text{ kJ/degmol}$$

$$C_p^{H_2O,9} = 0,034 + 6,28 \times 10^{-7} T + 5,4 \times 10^{-9} \times T^2 \text{ kJ/degmol}$$

$$C_p^{H_2O,1} = 0,075 \text{ kJ/degmol}$$

$$C_p^{\text{ξηρης βιομαζας}} = 0,103 + 0,0039T \text{ kJ/degkg}$$

$$c_p^{CH_4} = 0,022 + 4,81 \times 10^{-5} \times T$$



# Καύση Βιομάζας 3

-Η θερμότητα που απομακρύνεται με τα απαέρια είναι (λαμβάνοντας υπόψη μόνο τους δύο πρώτους όρους των εξισώσεων της θερμοχωρητικότητας):

$$\begin{aligned} &= 27,86 \times [0,043 \times (423 - 298) + (1,15/2) \times 10^{-5} \times (423^2 - 298^2)] + \\ &\quad + 2,14 \times [0,028 \times (423 - 298) + (5,02/2) \times 10^{-6} \times (423^2 - 298^2)] + \\ &\quad + 33,9 \times [0,034 \times (423 - 298) + (6,28/2) \times 10^{-7} \times (423^2 - 298^2)] + \\ &\quad + 8,57 \times [0,035 \times (423 - 298) + (1,08/2) \times 10^{-6} \times (423^2 - 298^2)] + \\ &\quad + 141,1 \times [0,027 \times (423 - 298) + (4,18/2) \times 10^{-6} \times (423^2 - 298^2)] = \\ &= 27,86 \times (5,38 + 0,52) + 2,14 \times (3,5 + 0,23) + 33,9 \times (4,25 + 0,03) + 8,57 \times (4,38 + \\ &0,05) + 141,1 \times (3,38 + 0,19) = 164,4 + 8,0 + 145,1 + 38,0 + 503,7 = 859,2 \text{ kJ/kg βιομάζας στην είσοδο} \end{aligned}$$

-Η λανθάνουσα θερμότητα είναι:  $33,9 \times 40,7 = 1.379,7 \text{ kJ/kg βιομάζας στην είσοδο}$  (ο ατμός όταν υγροποιείται αποδίδει θερμότητα  $40,7 \text{ kJ/mole ατμού}$ ).

(Μετατροπή °C σε K  $\rightarrow$  °C = K - 273)



# Καύση Βιομάζας 3

-Η ωφέλιμη θερμότητα είναι:

$$11.619,0 - 859,2 - 1.379,7 = 9380,1 \text{ kJ/kg βιομάζας στην είσοδο.}$$

- Η ΑΘΔ της βιομάζας που εισέρχεται στον καυστήρα σε 1 sec, είναι:

$$16.873,0 \times 0,72 = 12.148,6 \text{ kJ/kg βιομάζας}$$

-Η ΚΘΔ είναι:  $12.148,6 - (33,9 \times 40,7) = 10.768,9 \text{ kJ/kg βιομάζας}$

-Η απόδοση του καυστήρα, είναι:  $n_{th} = 9.380,1/12.148,6 = 77,2 \%$  της ΑΘΔ της τροφοδοσίας

και  $n_{th} = 9.380,1/10.768,9 = 87,1 \%$  της ΚΘΔ της τροφοδοσίας.



# Καύση Βιομάζας 3

-Να υπολογιστεί η θερμοκρασία καύσης (η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να εξέλθει ο ατμός από το λέβητα):

Η θερμοκρασία καύσης υπολογίζεται από το ισοζύγιο ενέργειας μεταξύ της εισόδου του καυστήρα και της εξόδου του (δηλαδή πριν τα απαέρια αποδώσουν οποιαδήποτε θερμότητα στο νερό του εναλλάκτη του λέβητα)

Η θερμότητα που παράγεται από την καύση βιομάζας στην είσοδο είναι 11.619,0 kJ/kg, ενώ η λανθάνουσα θερμότητα είναι 1.379,7 kJ/kg βιομάζας στην είσοδο.



# Καύση Βιομάζας 3

-Η ωφέλιμη θερμότητα στην περίπτωση αυτή είναι η αισθητή θερμότητα που περιέχουν τα απαέρια, πριν αυτά ψυχθούν στον εναλλάκτη του λέβητα, και με βάση το παραπάνω ισοζύγιο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \text{ωφέλιμη θερμότητα} &= 11.619,0 - 1.379,7 \Leftrightarrow \\ &27,86 \times [0,043 \times (T - 298) + (1,15/2) \times 10^{-5} \times (T^2 - 298^2)] + \\ &+ 2,14 \times [0,028 \times (T - 298) + (5,02/2) \times 10^{-6} \times (T^2 - 298^2)] + \\ &+ 33,9 \times [0,034 \times (T - 298) + (6,28/2) \times 10^{-7} \times (T^2 - 298^2)] + \\ &+ 8,57 \times [0,035 \times (T - 298) + (1,08/2) \times 10^{-6} \times (T^2 - 298^2)] + \\ &+ 141,1 \times [0,027 \times (T - 298) + (4,18/2) \times 10^{-6} \times (T^2 - 298^2)] = 10.239,3 \Leftrightarrow \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow &1,20 \times (T - 298) + 16,0 \times 10^{-5} \times (T^2 - 88804) + \\ &+ 0,059 \times (T - 298) + 5,37 \times 10^{-6} \times (T^2 - 88804) + \\ &+ 1,15 \times (T - 298) + 106,4 \times 10^{-7} \times (T^2 - 88804) + \\ &+ 0,30 \times (T - 298) + 4,63 \times 10^{-6} \times (T^2 - 88804) + \\ &+ 3,81 \times (T - 298) + 294,9 \times 10^{-6} \times (T^2 - 88804) = 10.239,3 \Leftrightarrow \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow &1,20 \times T - 357,6 + 16,0 \times 10^{-5} \times T^2 - 14,2 + \\ &+ 0,059 \times T - 17,58 + 5,37 \times 10^{-6} \times T^2 - 0,48 + \\ &+ 1,15 \times T - 342,7 + 106,4 \times 10^{-7} \times T^2 - 0,94 + \\ &+ 0,30 \times T - 89,4 + 4,63 \times 10^{-6} \times T^2 - 0,41 + \\ &+ 3,81 \times T - 1135,4 + 294,9 \times 10^{-6} \times T^2 - 26,2 = 10.239,3 \Leftrightarrow \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow 47,55 \times 10^{-5} \times T^2 + 6,52 \times T - 1984,9 = 10.239,3 \Leftrightarrow 47,55 \times 10^{-5} \times T^2 + 6,52 \times T - 12.224,2$$

$$T = (-6,52 \pm (6,52^2 + 4 \times 47,55 \times 10^{-5} \times 12.224,2)^{1/2}) / (2 \times 47,55 \times 10^{-5}) = 1671,2 \text{ K} = 1398,0 \text{ }^\circ\text{C}$$



# Καύση Βιομάζας 3

Ο ίδιος καυστήρας χρησιμοποιείται για την υπερθέρμανση ατμού στους  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  και την τροφοδοσία του σε ατμοστρόβιλο.

Να υπολογιστεί η ονομαστική ισχύς και η απόδοση της διάταξης καυστήρα - ατμοστροβίλου, αν η πίεση λειτουργίας του τελευταίου είναι  $30\text{ MPa}$  και η απόρριψη θερμότητας γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Η απόδοση της αντλίας και του στροβίλου θεωρούνται ίσες με  $85\%$  και το κλάσμα ατμού μετά τον στρόβιλο  $90\%$ .

## -Στάδια Κύκλου Rankine

1. Της παροχής νερού μέσω αντλίας, η οποία δαπανά έργο  $W_{in}$ , για να τροφοδοτεί το νερό αυτό στον λέβητα υπό υψηλή πίεση – ο βαθμός απόδοσης της αντλίας είναι συνήθως  $90\%$ .
2. Στο λέβητα, το νερό λαμβάνει θερμότητα  $Q_{in}$  και μετατρέπεται σε υπέρθερμο ατμό στην πίεση που αναπτύσσει η αντλία.
3. Ο υπέρθερμος ατμός, υπό πίεση, εκτονώνεται στο στρόβιλο και παράγει έργο ηλεκτρικό  $W_{out}$  μέσω της γεννήτριας στην οποία είναι συνδεδεμένος – ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου είναι  $90\%$  και ο ατμός εξέρχεται κορεσμένος στην πίεση του συμπυκνωτή.
4. όπου μεταπίπτει στην κατάσταση του κορεσμένου υγρού, στην ίδια πίεση, αποδίδοντας θερμότητα προς το περιβάλλον (στους  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



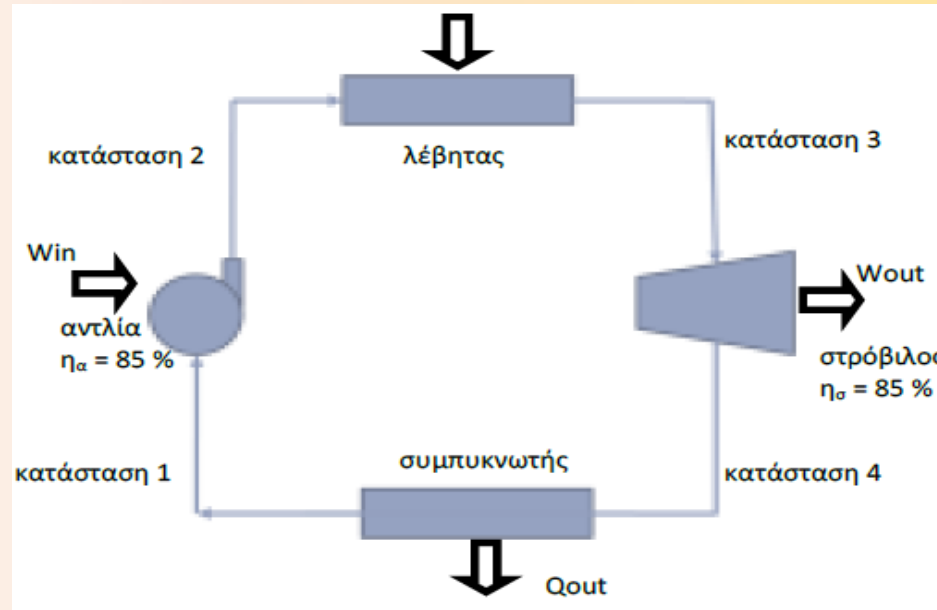
# Καύση Βιομάζας 3

Με βάση τις παραπάνω διεργασίες το ρευστό του ατμοστροβίλου (νερό/ατμός) διέρχεται από τέσσερις διαδοχικές καταστάσεις:

- Κατάσταση 1: κορεσμένο νερό σε θερμοκρασία  $T_1$  και πίεση  $P_1$  – η θερμοκρασία  $T_1$ , στους πλέον προηγμένους στροβίλους, είναι  $15\text{ }^\circ\text{C}$  πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, για να εξασφαλίζεται επαρκής ρυθμός μεταφοράς θερμότητας προς αυτό και η πίεση  $P_1$  είναι η πίεση ισορροπίας στη θερμοκρασία αυτή (αν το περιβάλλον βρίσκεται στους  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , η θερμοκρασία  $T_1$  είναι  $40\text{ }^\circ\text{C}$  και η πίεση ισορροπίας υγρού/ατμού  $P_1 = 7,384\text{ kPa}$ ).
- Κατάσταση 2: συμπιεσμένο νερό σε θερμοκρασία  $T_2 = T_1$  και πίεση  $P_2$  – η πίεση  $P_2$ , στους πλέον προηγμένους στροβίλους, είναι  $30\text{ MPa}$ .
- Κατάσταση 3: υπέρθερμος ατμός σε θερμοκρασία  $T_3$  και πίεση  $P_3 = P_2$  – η θερμοκρασία  $T_3$ , στους πλέον προηγμένους στροβίλους, είναι  $650\text{ }^\circ\text{C}$ . Στην περίπτωση μας  $T_3=600\text{ }^\circ\text{C}$ .
- Κατάσταση 4: μίγμα κορεσμένου υγρού/ατμού (κλάσμα ατμού  $80 - 100\%$ ) σε θερμοκρασία  $T_4 = T_1$  και πίεση  $P_4 = P_1$ .



# Καύση Βιομάζας 3



Η θερμότητα που αποδίδεται στον κύκλο Rankine είναι 9380,5 kJ/kg βιομάζας στην είσοδο ή 9380,5 kJ/sec, αφού η τροφοδοσία του καυστήρα είναι 1 kg βιομάζας/sec.

Η θερμότητα αυτή χρησιμοποιείται για να παράγει υπέρθερμο ατμό σε  $T_3 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$  και  $P_3 = 30 \text{ MPa}$ , από συμπιεσμένο νερό σε θερμοκρασία  $T_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  και  $P_2 = 30 \text{ MPa}$ .

Από τους Πίνακες 1 και 2 βρίσκουμε ότι η ενθαλπία του νερού στην κατάσταση 2 είναι 193,89 kJ/kg και η ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού στην κατάσταση 3 είναι 3443,9 kJ/kg. Οπότε η μαζική παροχή νερού/ατμού μέσω του λέβητα (και όλου του κύκλου Rankine) είναι:

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{9380,5 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}}{(3443,9 - 193,89) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 2,88 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$



# Καύση Βιομάζας 3

-Πίνακας 1

|      | $P = 20 \text{ MPa (365.81 } ^\circ\text{C)}$ |        |        |        | $P = 30 \text{ MPa}$ |        |        |        |     |
|------|---|--------|--------|--------|----------------------|--------|--------|--------|-----|
| Sal. | 0.002036                                      | 1785.6 | 1826.3 | 4.0139 |                      |        |        |        |     |
| 0    | 0.0009904                                     | 0.19   | 20.01  | 0.0004 | 0.0009856            | 0.25   | 29.82  | 0.0001 | 0.1 |
| 20   | 0.0009928                                     | 82.77  | 102.62 | 0.2923 | 0.0009886            | 82.17  | 111.84 | 0.2899 | 0.1 |
| 40   | 0.0009992                                     | 165.17 | 185.16 | 0.5646 | 0.0009951            | 164.04 | 193.89 | 0.5607 | 0.1 |
| 60   | 0.0010084                                     | 247.68 | 267.85 | 0.8206 | 0.0010042            | 246.06 | 276.19 | 0.8154 | 0.1 |
| 80   | 0.0010199                                     | 330.40 | 350.80 | 1.0624 | 0.0010156            | 328.30 | 358.77 | 1.0561 | 0.1 |
| 100  | 0.0010337                                     | 413.39 | 434.06 | 1.2917 | 0.0010290            | 410.78 | 441.66 | 1.2844 | 0.1 |
| 120  | 0.0010496                                     | 496.76 | 517.76 | 1.5102 | 0.0010445            | 493.59 | 524.93 | 1.5018 | 0.1 |
| 140  | 0.0010678                                     | 580.69 | 602.04 | 1.7193 | 0.0010621            | 576.88 | 608.75 | 1.7098 | 0.1 |
| 160  | 0.0010885                                     | 665.35 | 687.12 | 1.9204 | 0.0010821            | 660.82 | 693.28 | 1.9096 | 0.1 |
| 180  | 0.0011120                                     | 750.95 | 773.20 | 2.1147 | 0.0011047            | 745.59 | 778.73 | 2.1024 | 0.1 |
| 200  | 0.0011388                                     | 837.7  | 860.5  | 2.3031 | 0.0011302            | 831.4  | 865.3  | 2.2893 | 0.1 |
| 220  | 0.0011695                                     | 925.9  | 949.3  | 2.4870 | 0.0011590            | 918.3  | 953.1  | 2.4711 | 0.1 |
| 240  | 0.0012046                                     | 1016.0 | 1040.0 | 2.6674 | 0.0011920            | 1006.9 | 1042.6 | 2.6490 | 0.1 |
| 260  | 0.0012462                                     | 1108.6 | 1133.5 | 2.8459 | 0.0012303            | 1097.4 | 1134.3 | 2.8243 | 0.1 |
| 280  | 0.0012965                                     | 1204.7 | 1230.6 | 3.0248 | 0.0012755            | 1190.7 | 1229.0 | 2.9986 | 0.1 |
| 300  | 0.0013596                                     | 1306.1 | 1333.3 | 3.2071 | 0.0013304            | 1287.9 | 1327.8 | 3.1741 | 0.1 |
| 320  | 0.0014437                                     | 1415.7 | 1444.6 | 3.3979 | 0.0013997            | 1390.7 | 1432.7 | 3.3539 | 0.1 |
| 340  | 0.0015684                                     | 1539.7 | 1571.0 | 3.6075 | 0.0014920            | 1501.7 | 1546.5 | 3.5426 | 0.1 |
| 360  | 0.0018226                                     | 1702.8 | 1739.3 | 3.8772 | 0.0016265            | 1626.6 | 1675.4 | 3.7494 | 0.1 |
| 380  |   |        |        |        | 0.0018691            | 1781.4 | 1837.5 | 4.0012 | 0.1 |



# Καύση Βιομάζας 3

-Πίνακας 2

|      | $P = 25.0 \text{ MPa}$ |        |        |        | $P = 30.0 \text{ MPa}$ |        |        |        |
|------|------------------------|--------|--------|--------|------------------------|--------|--------|--------|
| 375  | 0.0019731              | 1798.7 | 1848.0 | 4.0320 | 0.0017892              | 1737.8 | 1791.5 | 3.0305 |
| 400  | 0.006004               | 2430.1 | 2580.2 | 5.1418 | 0.002790               | 2067.4 | 2151.1 | 4.4728 |
| 425  | 0.007881               | 2609.2 | 2806.3 | 5.4723 | 0.005303               | 2455.1 | 2614.2 | 5.1504 |
| 450  | 0.009162               | 2720.7 | 2949.7 | 5.5744 | 0.006735               | 2619.3 | 2821.4 | 5.4424 |
| 500  | 0.011123               | 2864.3 | 3162.4 | 5.9592 | 0.018678               | 2820.7 | 3081.1 | 5.7905 |
| 550  | 0.012724               | 3017.5 | 3335.6 | 6.1765 | 0.010166               | 2970.3 | 3275.4 | 6.0342 |
| 600  | 0.014137               | 3137.9 | 3491.4 | 6.3662 | 0.011746               | 3160.3 | 3443.9 | 6.2331 |
| 650  | 0.015433               | 3251.6 | 3637.4 | 6.5226 | 0.012596               | 3221.0 | 3598.9 | 6.4058 |
| 700  | 0.016646               | 3361.3 | 3777.5 | 6.5707 | 0.013661               | 3335.8 | 3745.6 | 6.5606 |
| 800  | 0.018912               | 3574.3 | 4047.1 | 6.9346 | 0.015623               | 3555.5 | 4024.2 | 6.8332 |
| 900  | 0.021045               | 3783.0 | 4309.1 | 7.1680 | 0.017448               | 3768.5 | 4291.9 | 7.0718 |
| 1000 | 0.02310                | 3990.9 | 4568.5 | 7.3802 | 0.019196               | 3978.0 | 4554.7 | 7.2867 |
| 1100 | 0.02512                | 4200.2 | 4828.2 | 7.5765 | 0.020903               | 4189.2 | 4816.3 | 7.4845 |
| 1200 | 0.02711                | 4412.0 | 5089.9 | 7.7605 | 0.022569               | 4401.3 | 5079.0 | 7.6892 |
| 1300 | 0.02910                | 4626.9 | 5354.4 | 7.9342 | 0.024266               | 4616.0 | 5344.0 | 7.8432 |



# Καύση Βιομάζας 3

-Πίνακας 3

Saturated water—Temperature table

| Temp.,<br>$T^{\circ}\text{C}$ | Sat. press.,<br>$P_{\text{sat}}$ , kPa | Specific volume, $\text{m}^3/\text{kg}$ |                   | Internal energy, $\text{kJ}/\text{kg}$ |                 |                   | Enthalpy, $\text{kJ}/\text{kg}$ |                 |                   | Entropy, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ |                 |                   |
|-------------------------------|--|---|-------------------|--|-----------------|-------------------|---------------------------------|-----------------|-------------------|---|-----------------|-------------------|
|                               |  | Sat. liquid, $v_f$                      | Sat. vapor, $v_g$ | Sat. liquid, $u_f$                     | Evap., $u_{fg}$ | Sat. vapor, $u_g$ | Sat. liquid, $h_f$              | Evap., $h_{fg}$ | Sat. vapor, $h_g$ | Sat. liquid, $s_f$                              | Evap., $s_{fg}$ | Sat. vapor, $s_g$ |
| 0.01                          | 0.6113                                 | 0.001000                                | 206.14            | 0.0                                    | 2375.3          | 2375.3            | 0.01                            | 2501.3          | 2501.4            | 0.000   | 9.1562          | 9.1562            |
| 5                             | 0.8721                                 | 0.001000                                | 147.12            | 20.97                                  | 2361.3          | 2382.3            | 20.98                           | 2489.6          | 2510.6            | 0.0761  | 8.9496          | 9.0257            |
| 10                            | 1.2276                                 | 0.001000                                | 106.38            | 42.00                                  | 2347.2          | 2389.2            | 42.01                           | 2477.7          | 2519.8            | 0.1510  | 8.7498          | 8.9008            |
| 15                            | 1.7051                                 | 0.001001                                | 77.93             | 62.99                                  | 2333.1          | 2396.1            | 62.99                           | 2465.9          | 2528.9            | 0.2245  | 8.5569          | 8.7814            |
| 20                            | 2.339                                  | 0.001002                                | 57.79             | 83.95                                  | 2319.0          | 2402.9            | 83.96                           | 2454.1          | 2538.1            | 0.2966  | 8.3706          | 8.6672            |
| 25                            | 3.169                                  | 0.001003                                | 43.36             | 104.88                                 | 2304.9          | 2409.8            | 104.89                          | 2442.3          | 2547.2            | 0.3674  | 8.1905          | 8.5580            |
| 30                            | 4.246                                  | 0.001004                                | 32.89             | 125.78                                 | 2290.8          | 2416.6            | 125.79                          | 2430.5          | 2556.3            | 0.4369  | 8.0164          | 8.4533            |
| 35                            | 5.628                                  | 0.001006                                | 25.22             | 146.67                                 | 2276.7          | 2423.4            | 146.68                          | 2418.6          | 2565.3            | 0.5053  | 7.8478          | 8.3531            |
| 40                            | 7.384                                  | 0.001008                                | 19.52             | 167.56                                 | 2262.6          | 2430.1            | 167.57                          | 2406.7          | 2574.3            | 0.5725  | 7.6845          | 8.2570            |
| 45                            | 9.593                                  | 0.001010                                | 15.26             | 188.44                                 | 2248.4          | 2436.8            | 188.45                          | 2394.8          | 2583.2            | 0.6387  | 7.5261          | 8.1648            |
| 50                            | 12.349                                 | 0.001012                                | 12.03             | 209.32                                 | 2234.2          | 2443.5            | 209.33                          | 2382.7          | 2592.1            | 0.7038  | 7.3725          | 8.0763            |
| 55                            | 15.758                                 | 0.001015                                | 9.568             | 230.21                                 | 2219.9          | 2450.1            | 230.23                          | 2370.7          | 2600.9            | 0.7679  | 7.2234          | 7.9913            |
| 60                            | 19.940                                 | 0.001017                                | 7.671             | 251.11                                 | 2205.5          | 2456.6            | 251.13                          | 2358.5          | 2609.6            | 0.8312  | 7.0784          | 7.9096            |
| 65                            | 25.03                                  | 0.001020                                | 6.197             | 272.02                                 | 2191.1          | 2463.1            | 272.06                          | 2346.2          | 2618.3            | 0.8935  | 6.9375          | 7.8310            |
| 70                            | 31.19                                  | 0.001023                                | 5.042             | 292.95                                 | 2176.6          | 2469.6            | 292.98                          | 2333.8          | 2626.8            | 0.9549  | 6.8004          | 7.7553            |
| 75                            | 38.58                                  | 0.001026                                | 4.131             | 313.90                                 | 2162.0          | 2475.9            | 313.93                          | 2321.4          | 2635.3            | 1.0155  | 6.6669          | 7.6824            |
| 80                            | 47.39                                  | 0.001029                                | 3.407             | 334.86                                 | 2147.4          | 2482.2            | 334.91                          | 2308.8          | 2643.7            | 1.0753  | 6.5369          | 7.6122            |
| 85                            | 57.83                                  | 0.001033                                | 2.828             | 355.84                                 | 2132.6          | 2488.4            | 355.90                          | 2296.0          | 2651.9            | 1.1343  | 6.4102          | 7.5445            |
| 90                            | 70.14                                  | 0.001036                                | 2.361             | 376.85                                 | 2117.7          | 2494.5            | 376.92                          | 2283.2          | 2660.1            | 1.1925  | 6.2866          | 7.4791            |
| 95                            | 84.55                                  | 0.001040                                | 1.982             | 397.88                                 | 2102.7          | 2500.6            | 397.96                          | 2270.2          | 2668.1            | 1.2500  | 6.1659          | 7.4159            |



# Καύση Βιομάζας 3

-Το ηλεκτρικό έργο που αποδίδει ο στρόβιλος του κύκλου Rankine είναι:

$$W_{out} = \eta_{\sigma} \times M_{H_2O} \times (H_3 - H_4) = 0,85 \times 2,88 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \times (3443,9 - 2333,6) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2718,0 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}$$

όπου  $H_3$  η ειδική ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού στην κατάσταση 3 και  $H_4$  η ειδική ενθαλπία του μίγματος κορεσμένου ατμού (90 %) και υγρού (10 %) στην κατάσταση 4 (Πίνακας 3): ( $T_1=T_2=T_4=40$  °C)

$$H_4 = 0,9 \times 2574,3 + 0,1 \times 167,57 = 2333,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

-Αντίστοιχα, το έργο που προσδίδει η αντλία στο κύκλο είναι:

$$W_{IN} = \frac{M_{H_2O} \times (H_2 - H_1)}{\eta_{\alpha}} = \frac{2,88 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \times (193,89 - 167,57) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,85} = 89,2 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}$$

όπου η  $H_1$  υπολογίζεται επίσης από τον Πίνακα 3.



# Καύση Βιομάζας 3

-Οπότε η καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τον ατμοστρόβιλο είναι:

$$W_{el} = 2718,0 - 89,2 = 2628,8 \text{ kWe} = 2,63 \text{ MWe}$$

-Η απόδοση του ατμοστροβίλου είναι:

$$\eta_{el} = 100 \times (2628,8/9380,5) = 28,0 \%$$

-Η συνολική απόδοση της διεργασίας ηλεκτροπαραγωγής από την καύση βιομάζας είναι:

$$\eta_{total} = 100 \times (2628,8/10768,5) = 24,4 \%$$