



# Πρωτότυπη εγκατάσταση οργανικού κύκλου Rankine για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από κύκλωμα ψύξης ναυτικής μηχανής diesel

Πλάτων Β. Πάλλης, Υποψ.Διδάκτωρ  
Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων  
Σχολή Μηχανολόγων μηχανικών  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Ηρώων Πολυτεχνείου 9,  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
Email: [plpallis@central.ntua.gr](mailto:plpallis@central.ntua.gr)  
URL: [www.lsbtp.mech.ntua.gr](http://www.lsbtp.mech.ntua.gr)

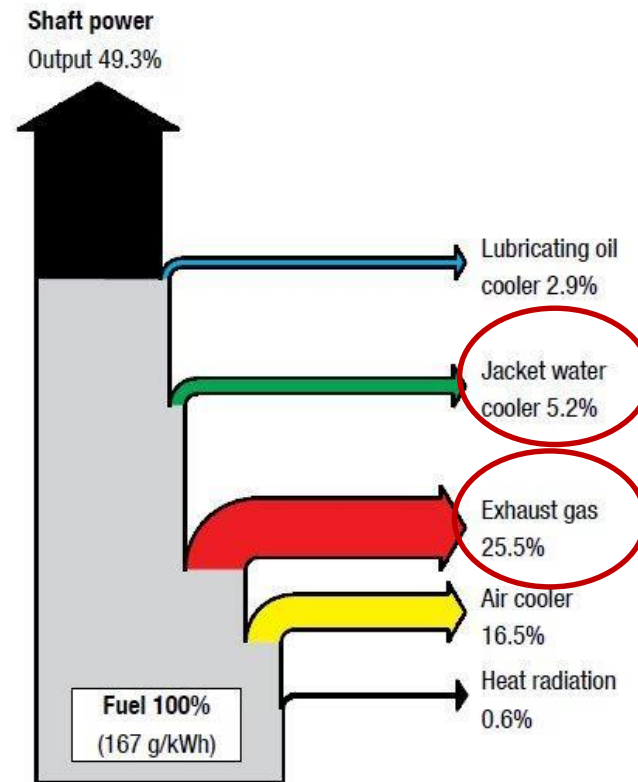




# Ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από ναυτικές μηχανές

- Τυπικές τιμές βαθμού απόδοσης ναυτικής μηχανής: 40-50%.
- Ζητούμενα:
  - Η εξοικονόμηση καυσίμου
  - Η μείωση των εκπομπών
- Αυστηρά όρια για το βαθμό απόδοσης των ναυτικών μηχανών από τον Δ.Ο.Ν.
- Απώλειες επί της ισχύος του καυσίμου:
  - ~25% από τα καυσαέρια
  - ~5% από το κύκλωμα ψύξης της μηχανής

12S90ME-C9.2 standard engine  
SMCR: 69,720 kW at 84 rpm  
ISO ambient reference conditions

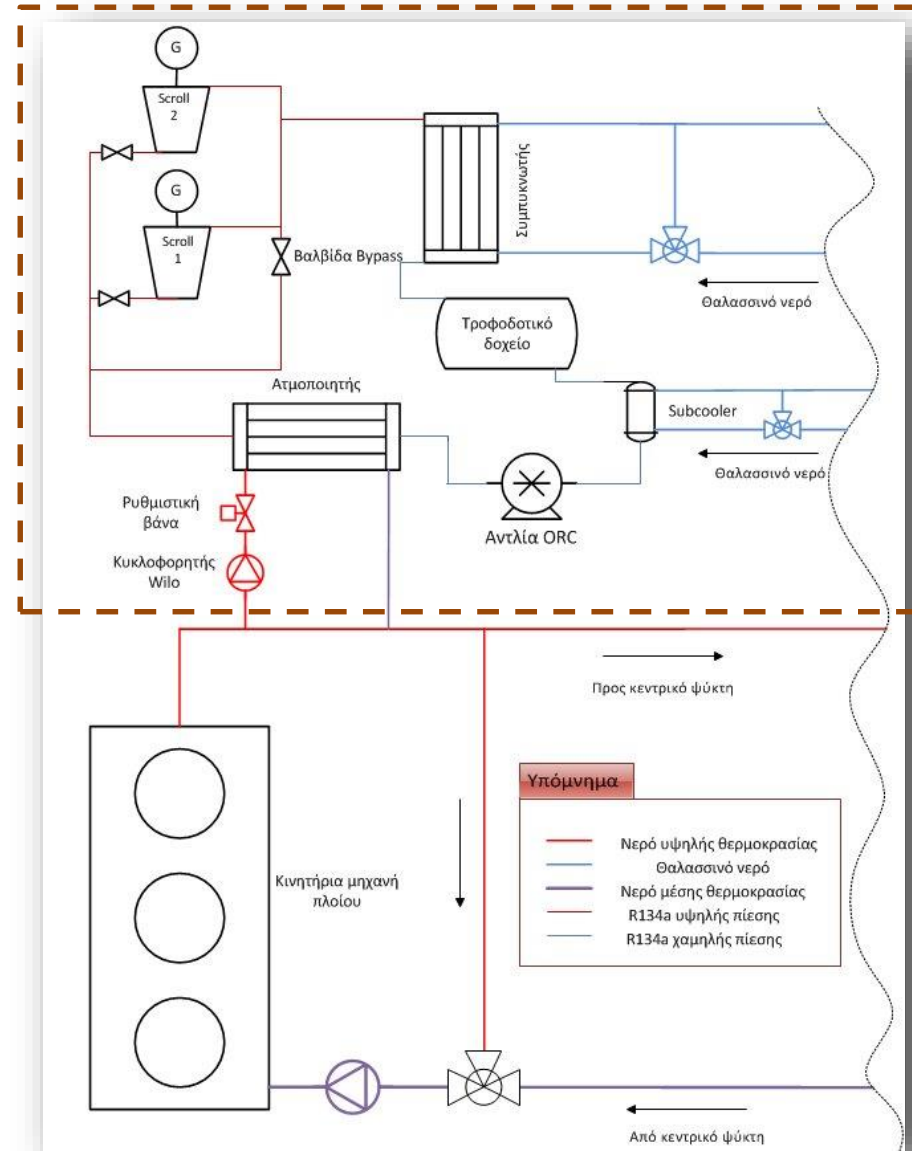




# To Marine ORC

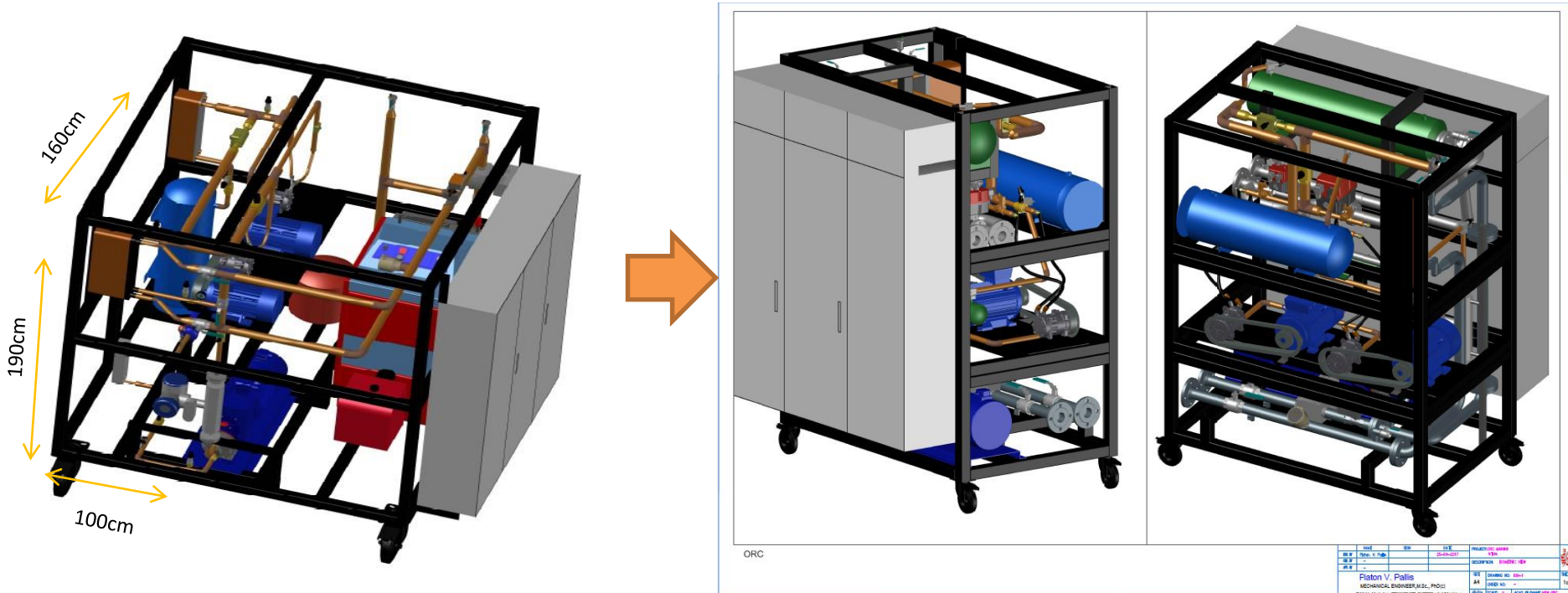
- Εργαζόμενο: R134a (GWP=1300, μη αναφλέξιμο, ODP=0, ASHRAE safety group clasification:A1))
- Χαμηλή θερμοκρασία πηγής (~ 90°C) / Εκμετάλλευση 80kW<sub>th</sub> απορριπτόμενης θερμότητας

Σημείο Σχεδιασμού	
$T_{hw}$ (°C)	90
$m_{hw}$ (kg/s)	1,5
$T_{cw}$ (°C)	15
$p_{evap}$ (bar <sub>a</sub> )	25
$p_{cond}$ (bar <sub>a</sub> )	7,82
$m_{wf}$ (kg/s)	0,41
$P_{net,el}$ (kW <sub>el</sub> )	<b>4,3</b>
$\eta_{net}$ (%)	5,2



# Εξελίξεις στον σχεδιασμό της μηχανής

- Μείωση εξωτερικών διαστάσεων  $>30\%$ .
- Αρθρωτός σχεδιασμός σε τρία μικρότερα πλαίσια για εύκολη συναρμολόγηση και μεταφορά.
- Χρόνος εγκατάστασής της απαιτεί 18 έως 36 ώρες, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του σημείου εγκατάστασης.



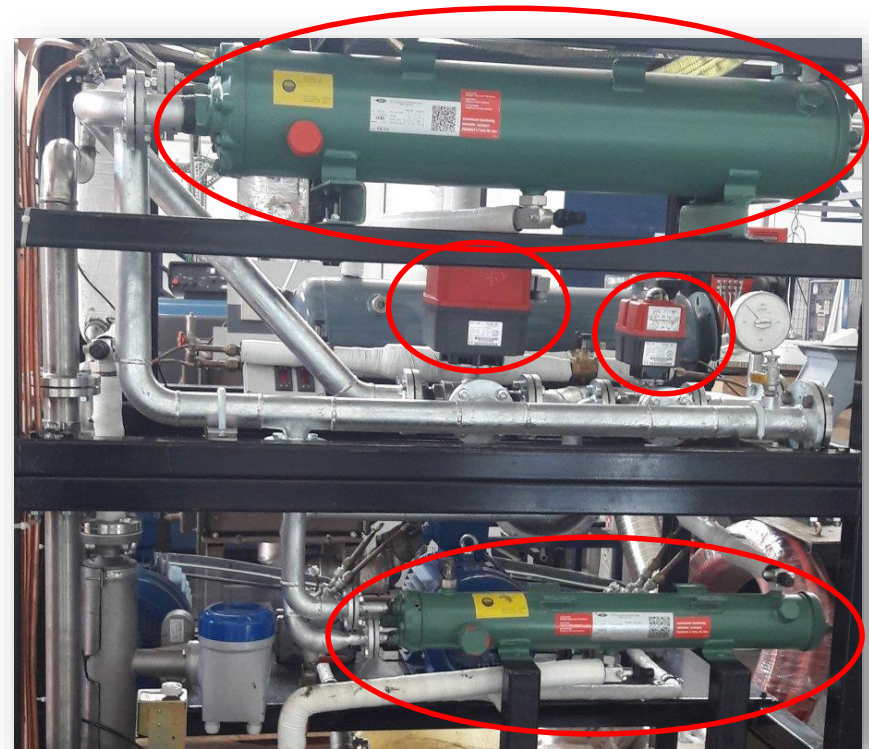
## Συνιστώσες της εγκατάστασης (1/2)

- Αντλία διαφράγματος για την επίτευξη υψηλών μανομετρικών
- Ολικός βαθμός απόδοσης ζεύγους κινητήρα-αντλίας  $\eta_{gl} = 40 - 50\%$
- Ρύθμιση στροφών με VFD
- Δύο ελικοειδείς εκτονωτές
- Επαγωγικές μηχανές σε λειτουργία γεννήτριας
- Ρύθμιση στροφών με regenerative VFD
- Ολικός ισεντροπικός βαθμός απόδοσης:  $\eta_{is,gl} = 45 - 55\%$



## Συνιστώσες της εγκατάστασης (2/2)

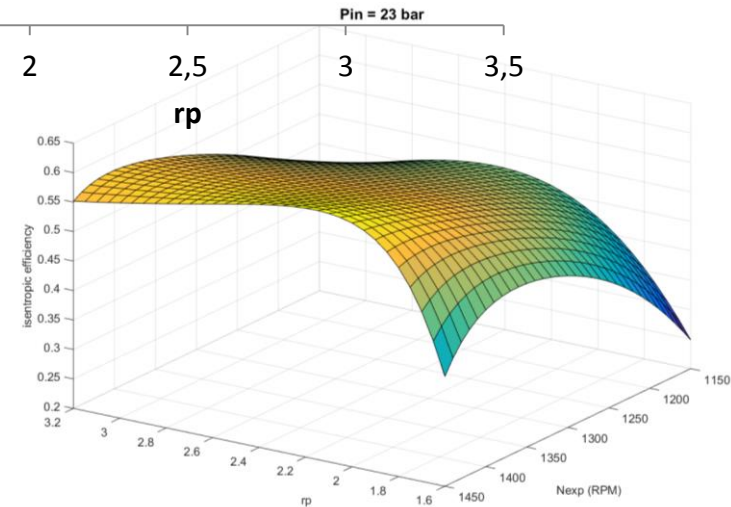
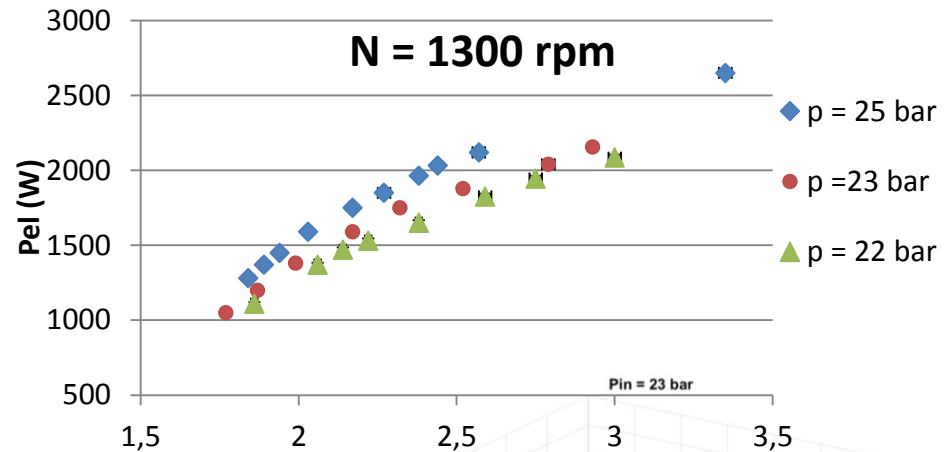
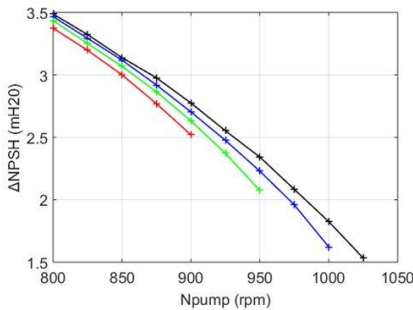
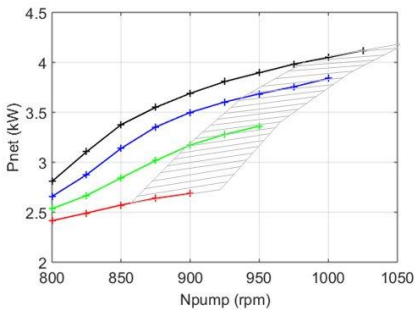
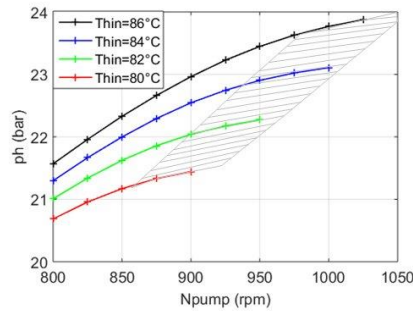
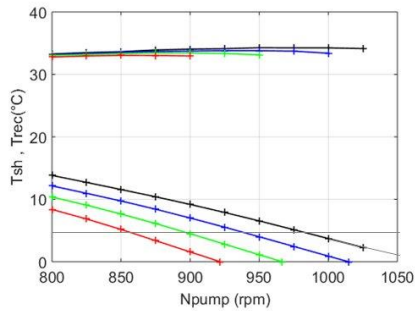
- Εναλλάκτες
  - **Ατμοποιητής:** πλακοειδής (με  $N=90$  πλάκες και μέγιστη πίεση λειτουργίας = 30 bar).
  - **Συμπυκνωτής:** κελύφους-αυλών με αντοχή σε θαλασσινό νερό.
  - **Εναλλάκτης υπόψυξης:** κελύφους-αυλών με αντοχή σε θαλασσινό νερό (απαραίτητος για την απόφυγή σπηλαιώσης της αντλίας).
- Δυνατότητα ρύθμισης παροχών νερού σε όλους τους εναλλάκτες με τρίοδες ή δύοδες βάνες





# Θεωρητική και πειραματική διερεύνηση

- Προσομοίωση και δημιουργία χαρτών λειτουργίας
- Πειραματική μελέτη και εξαγωγή καμπυλών





# Αυτόματος έλεγχος

- Χρήση PLC για τον έλεγχο της εγκατάστασης
- Επικοινωνία με το PLC και καταγραφή των δεδομένων μέσω 2 διαφορετικών HMI που έχουν αναπτυχθεί:
  - Σε οθόνη αφής προσαρμοσμένης στον ηλεκτρολογικό πίνακα
  - Σε Η/Υ με το λογισμικό LabView
- 4 ανεξάρτητοι PID ελεγκτές για τη ρύθμιση:
  - Της πίεσης ατμοποίησης
  - Της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης
  - Της πίεσης συμπύκνωσης
  - Της θερμοκρασίας υπόψυξης

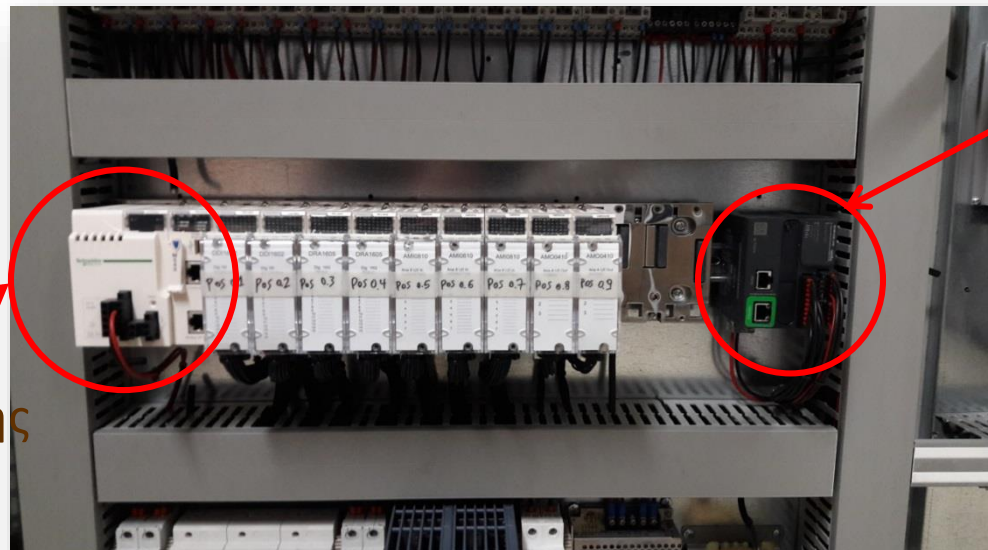






# Λοιπές λειτουργίες συστήματος αυτοματισμού (1/2)

- Εκκίνηση και κανονική παύση λειτουργίας
- Λειτουργία αναμονής
- Λειτουργία λήθαργου
- Κρίσιμοι έλεγχοι ασφαλείας και άμεση παύση (ESD)
  - Πραγματοποιούνται από ανεξάρτητη μονάδα PLC

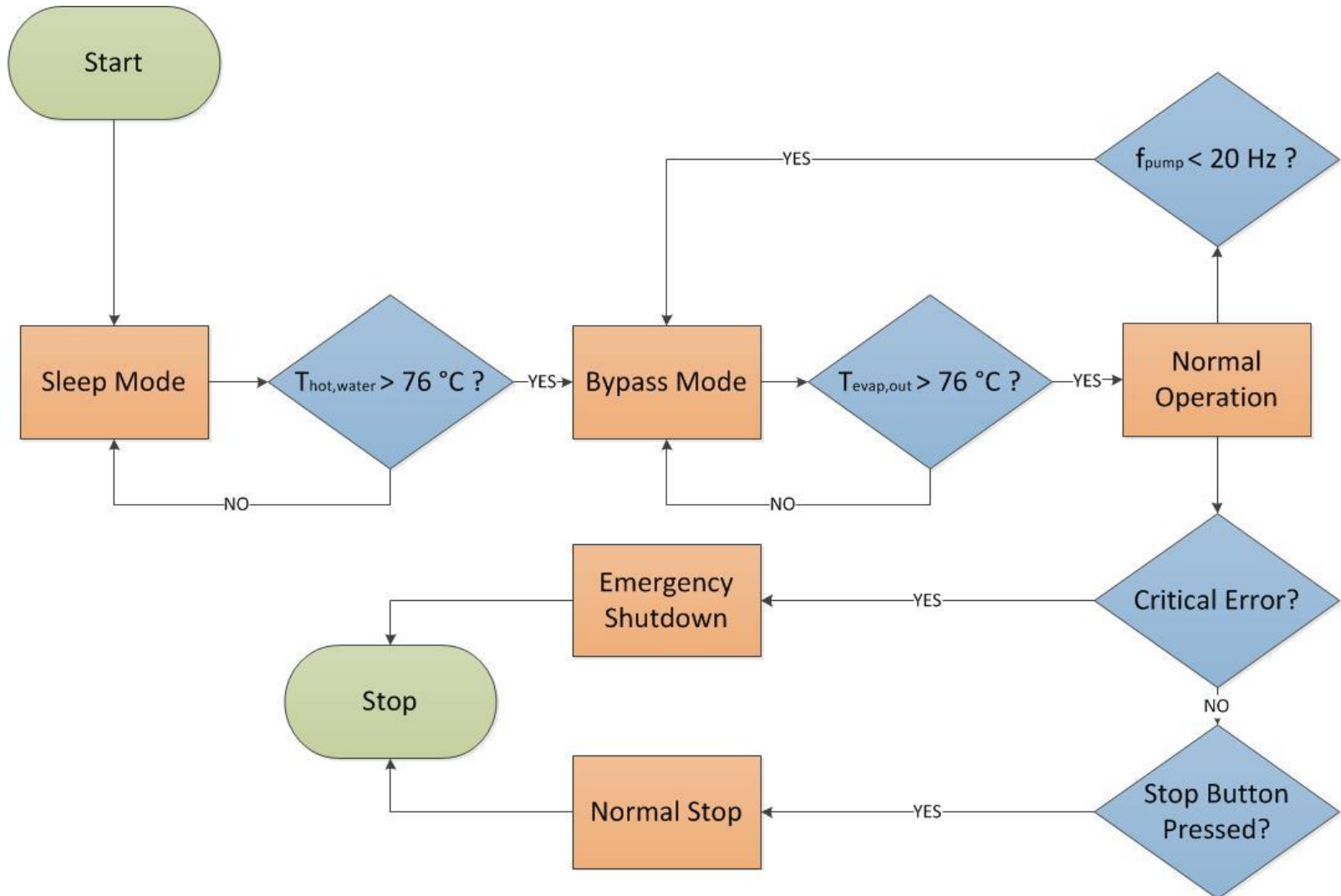


ESD PLC

PLC κανονικής  
λειτουργίας



# Λοιπές λειτουργίες συστήματος αυτοματισμού (2/2)

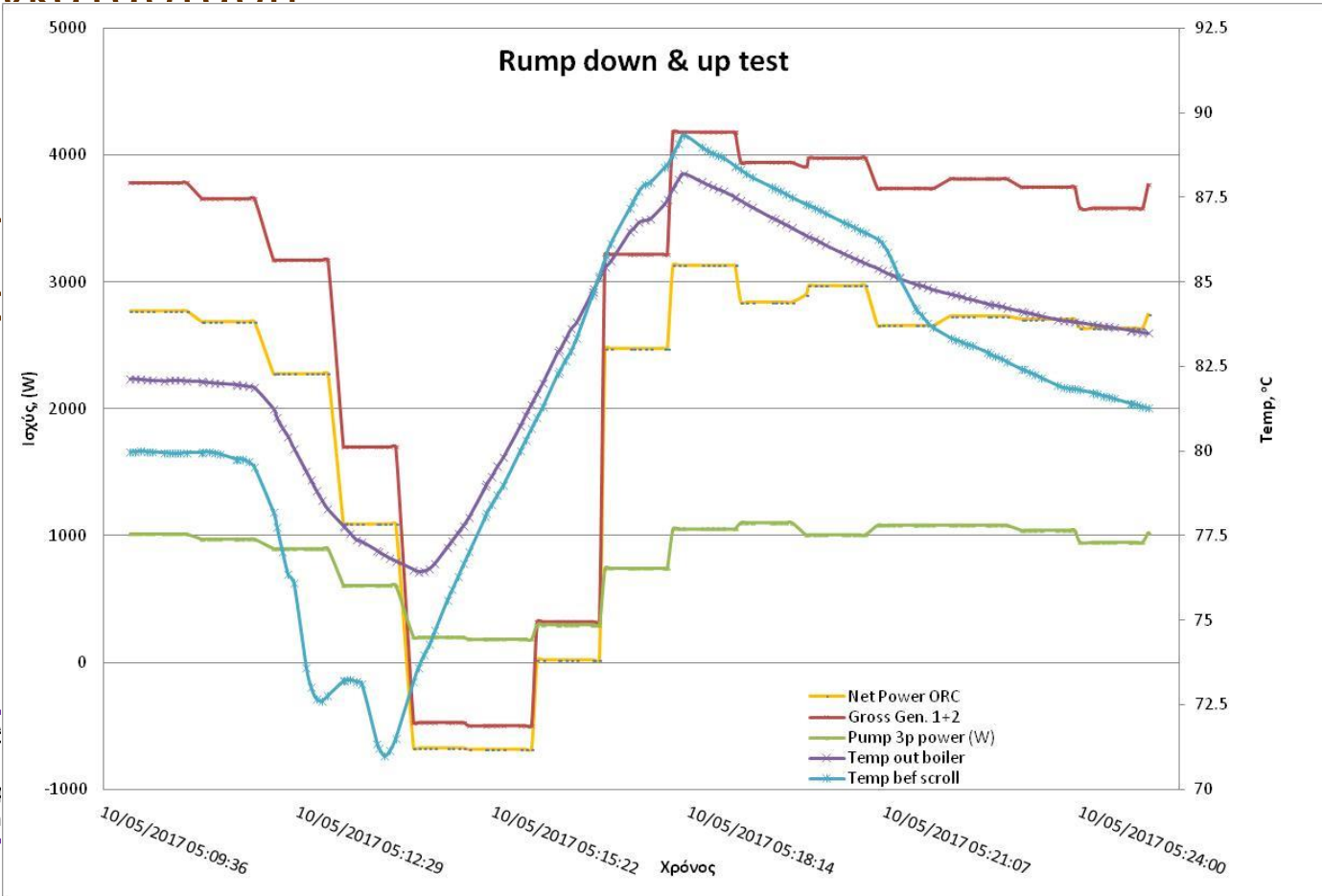




# Δοκιμές λειτουργίας της εγκατάστασης (1/2)

- Η εγκατάσταση:

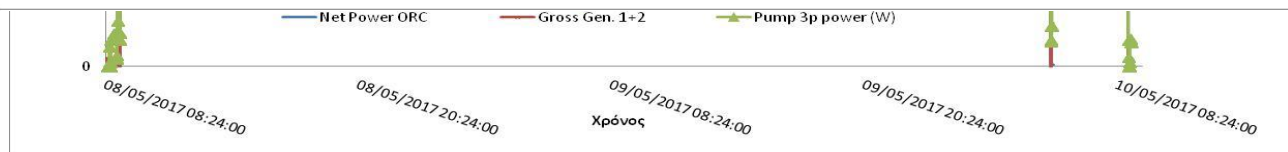
- Επί
- Αυτ



μορφή  
 ως

Εκκίνηση αυτο  
 λειτουργίας  
 κατάσταση ημ  
 (>30min

ας /  
 ση  
 γιας  
 ργο





# Δοκιμές λειτουργίας της εγκατάστασης (2/2)

- Η εγκατάσταση έχει περάσει επιτυχώς:
  - τους ελέγχους στεγανότητας
  - τους ελέγχους ορθής εγκατάστασης και λειτουργίας
- Έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία εκτίμησης κινδύνου και διαθέτει όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό ελέγχου και ασφαλείας.
- Το αποτέλεσμα είναι η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις DNVGL Rules for Ship PT. 4 Ch. 6 και η λήψη της σχετικής έγκρισης (Ιανουάριος 2017) .

MACROBUTTON NoName [Addressee's name - press F11 to jump to next field]      DNV GL AS Approval  
 LNG, Cargo Handling & Piping  
 Systems  
 P.O. Box 300  
 1322 Høvik  
 Norway  
 Tel: +47 67 57 90 26

**Date:** 2017-02-07      **Our reference:** MCANO385/HCKW/  
 P261.15-J-7499      **Your reference:**      **Job ID:** MCANO385-911A0334-1

**PIPING, Id. No. P261.15**  
**FW-3D drawings of experimental ORC unit**  
 Reference is made to your letter dated 2017-02-01. The following documents are stamped 2017-02-07 and given the status as shown below:

Document No	Rev	DNV GL No	Title	Code	Status
		2133	911A0334 - Major components description & Schematic diagrams ORC prototype 2017		For Inf.
	2134		911A0334 - ORC P& ID-ORC		Appr.w/comm
	2135		911A0334 - New ORC assembly Hot water circuit		For Inf.
	2135		911A0334 - New ORC assembly Hot water circuit		For Inf.
	2137		911A0334 - New ORC assembly SEA WATER		For Inf.

Document No. (empty), "911A0334 - ORC P& ID-ORC" has been reviewed in accordance with DNV Rules Pt. 4 Ch. 6 Sec. 6, with the following comment:

196	Scope	Important Note
	This drawing has been reviewed and examined and found to be compliant with DNVGL Rules for Ships, Pt. 4 Ch. 6 Piping systems (January 2017). The approval is limited to this experimental installation only. Please note that additional requirements will apply for units of a bigger size. Reference is made to Pt. 4 Ch. 6 Sec. 6 [1.1.1]. This unit is found to be compliant to be fitted inside an engine room of a ship. Please also note that the scope is limited to the unit itself. Connections to existing ship systems (cooling water, electrical systems, control and monitoring systems) have not been reviewed. Comment is given for your information only, no follow-up is needed.	

Approval Engineer for this approval is Hans-Christian Koch-Wintervoll.

DNV GL Headquarters, Veritasveien 1, P.O.Box 300, 1322 Høvik, Norway. Tel: +47 67 57 99 00. [www.dnvgl.com](http://www.dnvgl.com)

DNVc4753.docx



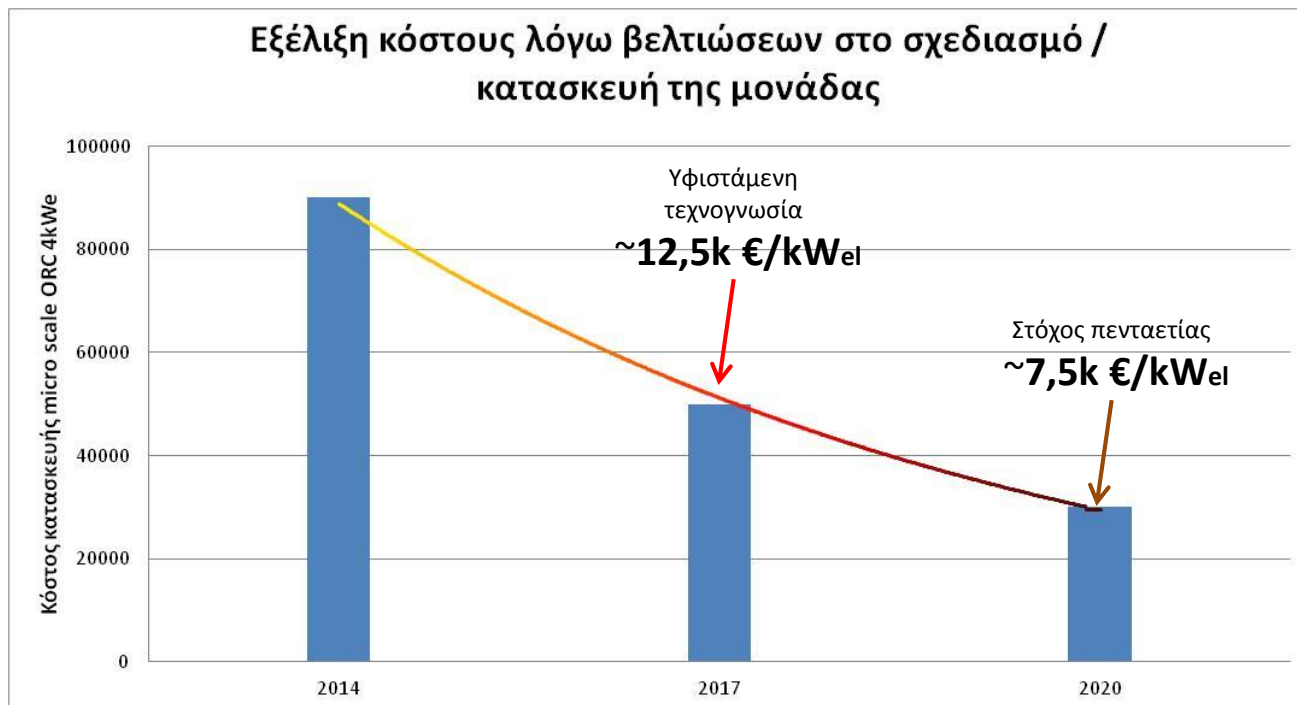
## Συμπεράσματα

- Η παρούσα εργασία οδήγησε στην κατασκευή μίας μικρής κλίμακας μονάδας ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας.
- Αποδείχθηκε ότι είναι δυνατή η πλήρως αυτοματοποιημένη λειτουργία της εγκατάστασης κοντά στο ονομαστικό της σημείο αλλά και σε μερικό φορτίο χωρίς προβλήματα.
- Απόκτηση σημαντικού θεωρητικού και τεχνικού υποβάθρου για την ανάπτυξη μονάδων ORC σε αυτήν την κλίμακα ισχύος (<20 kW).



## Στόχοι

- Δοκιμή της λειτουργίας της εγκατάστασης σε πραγματικές συνθήκες (on board).
- Ανάπτυξη έτοιμων προϊόντων στην κλίμακα micro ORC (2~20 kW), σε κόστος ανταγωνιστικό με βάση το state of the art.





# Προτάσεις για μελλοντική εργασία / συνεργασία

- Σε επόμενο στάδιο μελετάται η αναβάθμιση της εγκατάστασης σε μεγαλύτερη κλίμακα ισχύος, κάτι που εκτιμάται ότι μπορεί να οδηγήσει ταυτόχρονα σε σημαντική βελτίωση του βαθμού απόδοσης της αλλά και σημαντικές οικονομίες κλίμακας.
- Μέσω της αξιοποίησης της υφιστάμενης τεχνογνωσίας & τεχνολογίας διερευνείται η δυνατότητα:
  - αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας (υβριδικό σύστημα με χρήση συλλεκτών κενού για παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας)
  - αξιοποίηση των απωλειών θερμού καυσαερίων από μικρής / μεσαίας κλίμακας συμβατικών λεβήτων ζεστού νερού για παραγωγή ηλεκτρισμού και προθέρμανση νερού (micro scale ORC <2kW).

# Ευχαριστώ για την προσοχή σας

## Απορίες



Η ερευνητική ανάπτυξη του έργου συγχρηματοδοτήθηκε από την DNV GL



National Technical  
University of Athens

