

潜热利用式复合有机朗肯循环余热回收系统构建及优化-partA

王昕平¹, 马悦¹, 韩永强¹, 程兆辉¹, 金华玉², 王鹏², 虞浏²

(1. 吉林大学 能源与动力工程系, 长春 130000; 2. 一汽解放商用车开发院, 长春, 130000)

Parameter analysis of waste heat recovery system of latent heat utilization compound organic Rankine cycle-partA

WANG Xinping¹, MA Yue¹, HAN Yongqiang¹, CHENG Zhaohui¹, JIN Huayu², WANG Peng², YU Liu²

(1. Energy and Power Engineering Department, Jilin University, Changchun 130000, China; 2. FAW JIEFANG AUTOMOTIVE CO., LTD. Commercial Vehicle Development Institute, Changchun 130000, China)

Abstract: In order to make full use of the high exhaust gas temperature and reduce the latent heat loss, a compound organic Rankine cycle system with latent heat utilization is designed, which consists of two stages of high-temperature organic Rankine cycle (HTORC) and low-temperature organic Rankine cycle (LTORC), and is used to recover the high-temperature exhaust gas, medium-temperature coolant and latent heat of the working medium of a heavy-duty diesel engine. Wherein, the high-temperature cycle and the low-temperature cycle are coupled by an integrated evaporator/condenser, i.e., the low-temperature side of the mass condenses the high-temperature side of the mass while realizing the function of energy quality improvement of the low-temperature side of the mass and latent heat reuse of the high-temperature side of the mass. The results show that compared with the separate waste heat recovery systems for high-temperature exhaust gas and medium-temperature coolant, the latent heat utilization type composite system uses the high-temperature cycle condenser to further heat the low-temperature cycle and enhance the evaporation state of the low-temperature cycle working mass, which can give fuller play to the work potential of the low-temperature cycle.

摘要: 为充分利用柴油机余热、减少工质潜热损失, 设计了一种由高温有机朗肯循环 (HTORC)、低温有机朗肯循环 (LTORC) 两级循环组成的潜热利用式复合有机朗肯循环系统, 用于回收柴油机的高温尾气、中温冷却液及高温循环的乏气潜热。其中, 高温循环、低温循环通过一种集成式蒸发/冷凝器进行耦合, 即利用低温侧工质对高温侧工质进行冷凝的同时实现低温侧工质能量品质提升和高温侧工质潜热再利用的功能。结果表明, 相比于高温尾气和高温冷却液各自独立的余热回收系统, 该潜热利用式复合系统利用高温循环冷凝器给低温循环进一步加热, 提升低温循环工质的蒸发状态, 能够更加充分发挥低温循环的做功潜力。

关键词: 余热回收; 有机朗肯循环; 潜热利用; 复合循环; 耦合换热

Key words: waste heat recovery; organic Rankine cycle; latent heat utilization; dual loop; coupled heat transfer

中图分类号: TK411+.5 文献标识码: A

0 概述

升石油和电力消费持续增加, 研究表明, 约 60% 的

随着经济社会的发展, 全球能源需求大幅度提 一次能源在燃烧和热功转换过程中以余热的形式损

收稿日期: 2023-06-30

项目名称: 吉林大学科技成果概念验证项目 (2023GN013)

作者简介: 作者王昕平 (1995-10-10), 女, 博士生, 主要研究方向为余能回收领域, E-mail: wxp19@mails.jlu.edu.cn;

作者马悦 (联系人), E-mail: yuema21@mails.jlu.edu.cn.

失^[1]。而应用于重型柴油机的燃油在燃烧中仅有30-40%的能量转化为输出机械功，其余能量都以尾气、冷却液的形式散失^[2]，这些余热直接排放到环境中造成了大量能源浪费和环境热污染，因此探求高效率的余热回收技术对节能和环保有重要意义。在众多余热回收技术中，有机朗肯循环由于结构简单，回收效率高且对柴油机原机的影响较小，因此有较大的应用前景。

工质作为有机朗肯循环中热功转化及输出的重要媒介，针对工质的选择除人们重视的环保绿色性能、低毒或者无毒性以外，针对不同的热源还应该具有一定的适配性，针对在不同形式的循环中还需要具有工作的高效性。

尾气的热源温度较高，在使用传统制冷剂时会产生很高的蒸发压力，给系统的运行带来强度限制，因此随着回收的余热热源温度提高，开始引入烷烃类物质，比如 Yadong Zhu 等人在对膨胀比的研究中，引入 R245fa、环己烷等六种工质进行模拟，以热效率和净功率为指标，得出 R245fa 作为工质的系统会有更优性能，但是在不完全膨胀状态下，环己烷会更适合系统^[3]；Debranjani Das 等人在绿色环保、安全无毒以及低可燃性的工质中选择二甲醚、乙醚、R1234yf 和异丁烷进行简单超临界有机朗肯循环的系统设计研究，最终得出二甲醚和异丁烷在一定的蒸发温度和蒸发压力内是优于其他工质的结论^[4]；舒歌群对烷烃在有机朗肯循环中的应用进行探索，在发动机进行余热回收中尾气热源的温度比较高的情况下，他认为环庚烷、环己烷和环戊烷三种烷烃作为工质的有机朗肯循环在柴油机尾气回收方面有很好的潜力^[5]；Peng Liu 以烷烃类物质作为工质，布置了一种两级膨胀有机朗肯循环系统用以回收内燃机提供的多梯度热源余热，结果表明，环烷烃相比直链烷烃在系统性能方面更优，具有更高的输出功率^[6]。

冷却液的温度较低，因此针对低温热源的回收

常常采用一些氟利昂工质。E. H. Wang 等人引入了制冷剂，选择了九种有机工质，通过设定有机朗肯循环应用于不同工况下的汽车排放，结果得出 R11、R113 等四种拥有更好的热力学性质，但这些工质在环保方面都略有不足^[7]；宋健针对五个不同温度梯度的热源形式进行余热回收，设计了五个独立有机朗肯循环子系统的循环方案，并最终确定使用一种 R141b 的工质的双集成有机朗肯循环子系统具有更优的余热回收效果^[8]；Yang 等人在控制和改变膨胀机进出口压力的情况下使用 R245fa、R1234yf、R1234ze、R152a 和 R600a 作为回收船用柴油机余热的工质，得出以 R1234yf 为工质的余热回收系统的经济性最高，要比以 R245fa 作为工质的有机朗肯循环系统高出 9%^[9]；另外一些氟利昂工质如 R245fa、R245ca、R236fa 等的性能较好，但是考虑到近些年对环保性能和全球变暖危机的要求，逐渐采用 R1233zd 对 R245fa 进行代替使用^[10]。除了 R1233zd，拟作为 R245fa 替代品的制冷剂还有 R1224yd(Z)，R1233zd(E) 和 R1336mzz(Z)，研究表明，R1224yd(Z) 和 R1233zd(E) 都非常合适作为 R245fa 替代品，虽然后者的输出功率的表现略低于前者，但是 R1233zd(E) 在释放二氧化碳当量值的方面比 R245fa 减小 67%^[11]，且 R1233zd(E) 与 R245fa 的性质非常接近，在替代使用时不需要对 ORC 的关键循环部件进行重新设计^[12]，这大大降低了替换成

本；作为与 R1233zd(E) 互为立体异构体的 R1233zd 与其性质接近，在将 R1233zd 和 R245fa 作为工质参与有机朗肯循环的余热回收研究中^[13]，对循环中的蒸发器、涡轮机、和冷凝器进行了热量平衡分析，结果表明，R1233zd 的优势在于净输出功率相同的同时，减小了工质泵的消耗；此外实验表明，R1233zd 更适合重载汽车长途运行中的余热回收场合。

在此基础上研究对一款重型柴油机的余热回收进行定性探讨和趋势分析。设计了一种由回收尾气能量的高温循环 (HTORC) 和回收冷却液能量的低温循环 (LTORC) 构成的潜热利用式复合有机朗肯循环系统，两级循环间通过集成式蒸发/冷凝器进行耦合。高温循环选用环己烷为工质，低温循环选用 R1233zd 为工质。本文主要对该复合系统的系统构建、加热策略，及工作参数变化对系统性能的影响进行研究，并以此得出系统的优化策略。partA 主要论述系统的架构及加热策略。

1 系统描述

1.1 发动机的余热源描述

本文基于一种重型柴油机进行余热回收系统的研究，发动机的余热源数据如表 1 所示，尾气的成分如表 2 所示。根据混合气体中不同气体的质量占比可以得出在特定的压力和温度下混合气体的热物理性质，例如比焓、比熵等^[14]。由此可以分别得出尾气和冷却液中的能量，见表 3，这部分可观的能量进一步证明了该重型柴油机的余热量具有较大的

回收潜力。

$$h_{gas} = \sum x_i h_i \quad (1)$$

$$Q_{gas} = q_{m_{gas}} (h_{gas, in} - h_{gas, out}) \quad (2)$$

$$Q_{coolant} = q_{m_{cool}} (h_{cool, in} - h_{cool, out}) \quad (3)$$

式中， h_{gas} 表示尾气混合物的焓值， x_i 表示各组分的质量分数， h_i 表示该组分的焓值； Q_{gas} 表示尾气提供的总热量， $q_{m_{gas}}$ 表示尾气质量流量， $h_{gas, in}$ 和 $h_{gas, out}$ 分别表示蒸发器进、出口尾气混合物的焓值； $Q_{coolant}$ 表示尾气提供的总热量， $q_{m_{cool}}$ 表示尾气质量流量， $h_{cool, in}$ 和 $h_{cool, out}$ 分别表示蒸发器进、出口尾气混合物的焓值

表 1 发动机余热源参数

项目	参数
蒸发器入口发动机尾气温度	603.8 K
蒸发器出口发动机尾气温度	393.15 K
尾气质量流量	1269.5 kg/h
蒸发器进口冷却液温度	373.15 K
蒸发器出口冷却液温度	368.15 K
冷却液质量流量	5.83 kg/s

表 2 设计工况下尾气成分

项目	占比 (%)
O ₂	20.078
CO ₂	0.176
NO _x (NO ₂)	0.018
CO	0.006
H ₂ O	5.0195
HC(CH ₄)	0
N ₂	74.7025

表 3 设计工况下尾气和冷却液能量

项目	参数
尾气可用能量	72.5695kW
冷却液可用能量	122.80kW
总能量	195.3695kW

1.2 潜热利用式复合有机朗肯循环系统构建

为吸收柴油机尾气及冷却液的余热，构建了两个相互独立的标准有机朗肯循环系统，并将其称为双回路并联有机朗肯循环系统。此系统主要缺点在于两个独立系统的工质在冷凝器内的热量交换皆为

损耗，回收效率不高。

由此提出一种复合循环架构，由冷却液循环（即低温有机朗肯循环，LTORC）的工质吸收尾气循环（即高温有机朗肯循环，HTORC）工质的汽化潜热，将两个并联的独立系统协同起来，同时高温循环选用临界温度更高的工质——环己烷，在吸收尾气热量后可到达更高的温度，膨胀作功后的乏气温度也更高，随后进入耦合换热器利用温差将余下的热量传递给低温循环的工质，低温工质可获得更高的温度，进而达到更高的蒸发压力，提高整个系统的回收效率。这一复合循环架构被称为潜热利用式复合有机朗肯循环系统。

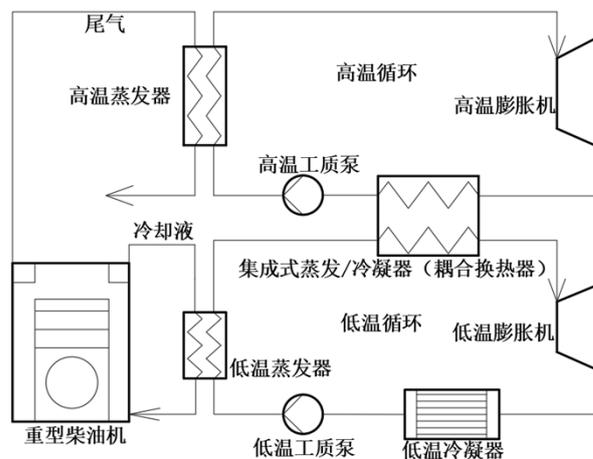


图 1 潜热利用式复合有机朗肯循环架构图

图 1 所示为潜热利用式复合有机朗肯循环架构图。将高温循环冷凝器与低温循环再热器进行耦合，以此将两个循环进行协同，由低温循环工质吸收高温循环工质的汽化潜热，能量得到进一步充分利用。

高温循环中，低温低压液态工质进入高温工质泵，消耗极少机械功被加压入到高温蒸发器内，工质在高温蒸发器吸收来自柴油机尾气的能量蒸发为高压过热态的气体，进入高温膨胀机中膨胀对外输出机械功，做功后的乏气进入集成式蒸发/冷凝器中被冷凝为过冷态，并且在此处将放热量交换给低温循环，之后进入下一循环。

低温循环中，低温工质在低温蒸发器内吸收来自冷却液的能量，该蒸发器在后文也被称为低温第一级蒸发器，接着进入集成式蒸发/冷凝器吸收来自高温循环的工质汽化潜热变为高温高压的低温循环气态工质，该蒸发器在后文也被称为低温第二级蒸发器，工质进入低温膨胀机对外输出机械功后变成高温低压的过热气体，乏气进入低温冷凝器进行冷凝为过冷态后经过低温工质泵进入下一个循环。

2 热力学模型

2.1 潜热利用式复合有机朗肯循环 T-s 图

如图 2 所示为潜热利用式复合有机朗肯循环的 T-s 图，过程 1, h-2, h_s 表示高温膨胀机的等熵过程，1, h-2, h 表示考虑熵产和熵流的高温膨胀机的实际过程，2, h-3, h 表示在集成式冷凝/蒸发器中，表示对环己烷的冷凝过程，3, h-4, h 表示高温工质泵的加压，4, h-1, h 表示环己烷在高温蒸发器中吸收尾气能量。低温循环 4, l-1, l 表示在低温蒸发器和集成式冷凝/蒸发器中对低温工质的加热蒸发过程，其余过程与高温循环相同。

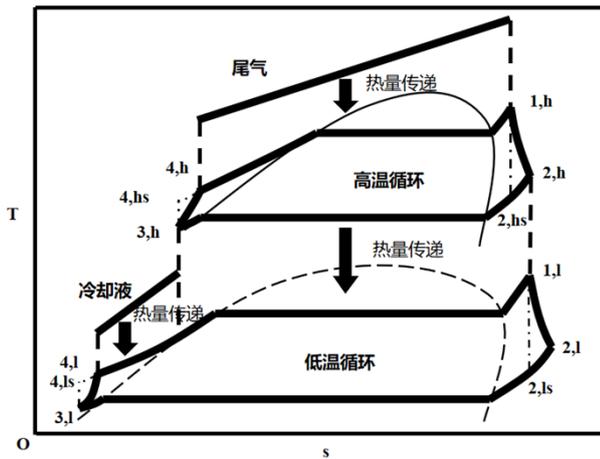


图2 潜热利用式复合有机朗肯循环 T-s 图

2.2 条件和假设

本文在对循环系统做出分析时依据了以下条件和假设：

- (1) 忽略系统中除压力变化器外的压力损失，如管道、换热器等的压降，即在换热器和管路中认为是等压过程；
- (2) 将膨胀机的等熵效率和机械效率综合考虑，将总其效率设置为 0.8，工质泵的效率基于相同缘由同样设置为 0.8^[15]；
- (3) 关于回路中换热器的最小传热温差设定^[16]：尾气与高温尾气之间的换热器窄点温度为 30℃，其余换热器的窄点温差为 5℃；
- (4) 低温循环的冷凝温度设置为 35℃^[17]；

3 加热策略制定

3.1 问题描述

在潜热利用式复合有机朗肯循环系统中，高温循环的潜热利用是提升系统热效率的关键，高温潜

热的利用则是通过集成式蒸发/冷凝器实现的，因此该处高温工质和低温工质之间的传热平衡尤需注意。

设置系统高温循环蒸发压力为 2MPa、低温循环蒸发压力在 0.4-1.6MPa 之间变化，进而得到耦合换热器处的高温循环潜热量、低温工质需求能量之间的关系如图 3 所示。可以看出，当低温循环的蒸发压力高于某个值时，高温循环潜热量不足以提供低温循环需求的热量，这意味着低温工质在集成式蒸发/冷凝器出口时没有汽化为过热态，此时低温工质干度如图 4 所示。干度表示饱和蒸汽所占质量分数，应该在 0 和 1 之间，所以在曲线的前半段用虚线表征低温工质的过热程度，曲线的后半段干度小于 1，工质是湿饱和蒸汽态。

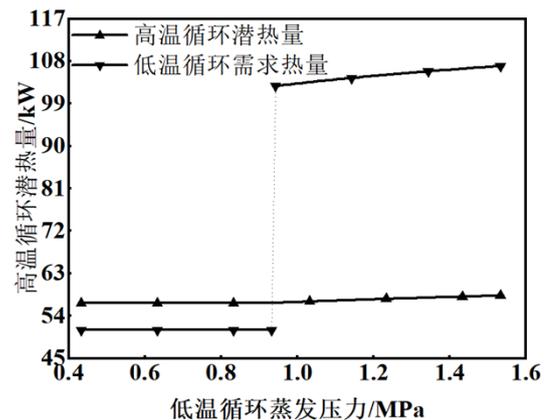


图3 高温潜热量和低温循环需求热量关系

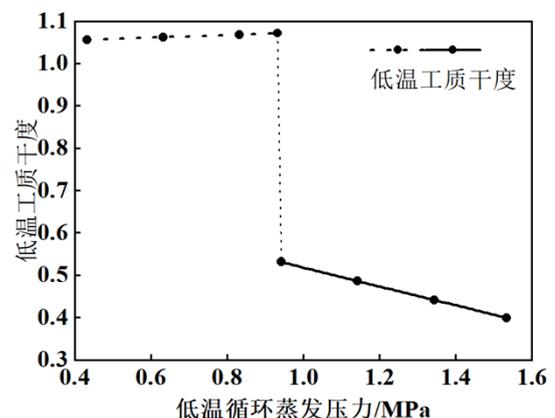


图4 低温工质的干度

3.2 加热策略

为解决上一节集成式蒸发/冷凝器中存在低温工质无法蒸发问题，在本节提出了图5的加热分析策略。潜热利用式复合有机朗肯循环系统的运行过程中，冷却液余热和高温循环潜热在集成式蒸发/冷凝器加热低温循环工质。冷却液可将低温工质加热到最高温度对应的蒸发压力为 p_{efcl} 。当低温循环的蒸发压力 $p_{1,l} \leq p_{efcl}$ 时，工质在低温蒸发器和集成式蒸发/冷凝器之间为湿饱和蒸汽态，其质量流量便由冷却液能量、高温循环潜热量以及工质比焓增量共同决定。当低温循环的蒸发压力 $p_{1,l} > p_{efcl}$ 时，工质在低温蒸发器出口是过冷状态，此时高温潜热量和工质比焓增量来决定低温工质的质量流量。如图6、图7所示，使用上述加热策略后，高温潜热量可以满足低温工质蒸发为过热态的需要。图7中用虚线表征工质的过热程度。

图5 低温循环加热策略

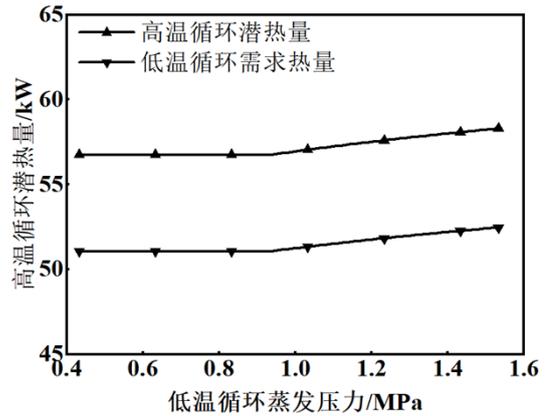


图6 分段策略下的耦合换热器热量供需

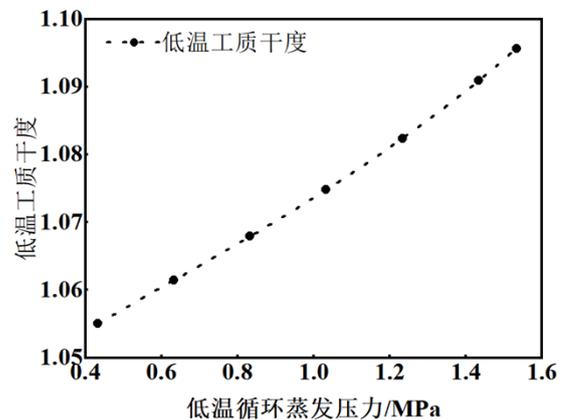
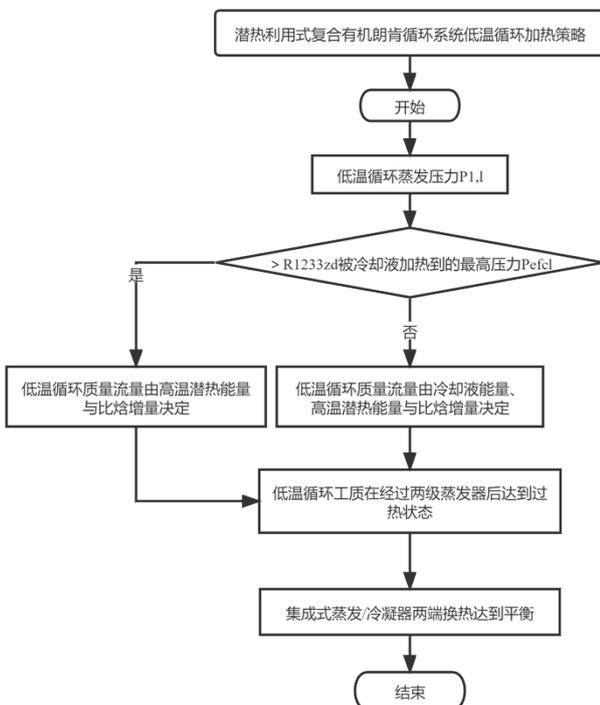


图7 分段策略下的低温工质干度

分段加热策略已解决在耦合换热器处高温潜热量和低温所需加热量的平衡问题，后续的仿真研究皆在此基础上进行。



3.3 系统先进性分析

与双回路并联系统相比，潜热利用式复合有机朗肯循环系统的回收效率更高，但结构较为复杂，综合考虑集成式换热器中的换热损失及上述加热策略影响，对两种系统进行性能对比分析。

通过仿真计算冷却液循环蒸发压力在 0.18-0.93MPa 范围内两种系统的输出净功率，得到如下图8所示结果，在相同能量输入情况下潜热利用式复合系统的净输出功率始终大于并联双回路循环，低温循环蒸发压力为 0.93MPa 时，复合系统输出功率 23.94kW，并联双回路系统为 20.36kW，复合系

统高出 17.4%，由此可证明该潜热利用式复合有机朗肯循环系统与传统有机朗肯循环系统相比存在较大优势，且仍存在很大优化空间。

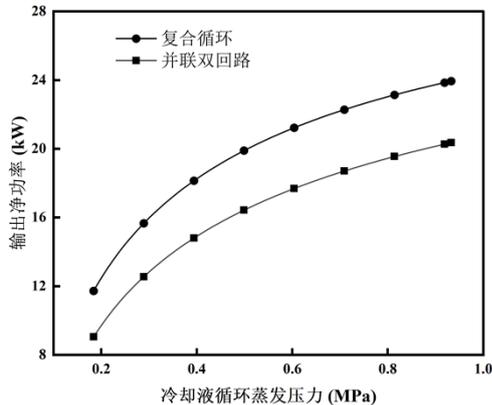


图 8 净输出功率对比

4 结论

为了提升柴油机余热回收效率本文提出了一种由高温循环和低温循环组成的潜热利用式复合有机朗肯循环系统，用于回收重型柴油机高温尾气、中温冷却液和高温循环余热。考虑依低温蒸发压力的大小进行分段加热，探究该余热回收系统的合理性及优势，得到如下几点结论：

(1) 本文所描述的潜热利用式朗肯循环余热回收系统在双热源余热回收的情况下优势显著，相比于独立的双回路有机朗肯循环系统在净输出功率上可提升 17%，先进性及可行性较高；

(2) 该系统的效率提升主要瓶颈在于当低温循环的蒸发压力大于冷却液所能加热到的最高温度对应蒸发压力后的工质流量配比及系统加热策略优化。

参考文献：

[1] P, V. and D. Deshmukh, A comprehensive review of waste heat recovery from a diesel engine using organic rankine cycle. *Energy Reports*, 2021. 7: p. 3951-3970.

[2] Jadhao, J.S. and D.G. Thombare, Review on exhaust gas heat recovery for I. C engine. *International*

Journal of Engineering and Innovative Technology, 2013. 2(12): p. 93-100.

- [3] Zhu, Y., et al., Impact of built-in and actual expansion ratio difference of expander on ORC system performance. *Applied Thermal Engineering*, 2014. 71(1): p. 548-558.
- [4] Das, D., et al., Optimal hydrocarbon based working fluid selection for a simple supercritical Organic Rankine Cycle. *Energy Conversion and Management*, 2021. 243.
- [5] Shu, G., et al., Alkanes as working fluids for high-temperature exhaust heat recovery of diesel engine using organic Rankine cycle. *Applied Energy*, 2014. 119: p. 204-217.
- [6] Liu, P., et al., Alkanes based two-stage expansion with interheating Organic Rankine cycle for multi-waste heat recovery of truck diesel engine. *Energy*, 2018. 147: p. 337-350.
- [7] Wang, E.H., et al., Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery. *Energy*, 2011. 36(5): p. 3406-3418.
- [8] Song, J., Y. Song, and C.-w. Gu, Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines. *Energy*, 2015. 82: p. 976-985.
- [9] Yang, M.-H. and R.-H. Yeh, Thermo-economic optimization of an organic Rankine cycle system for large marine diesel engine waste heat recovery. *Energy*, 2015. 82: p. 256-268.
- [10] Hoang, A.T., Waste heat recovery from diesel engines based on Organic Rankine Cycle. *Applied Energy*, 2018. 231: p. 138-166.
- [11] Dawo, F., et al., R1224yd(Z), R1233zd(E) and R1336mzz(Z) as replacements for R245fa: Experimental performance, interaction with lubricants and environmental impact. *Applied Energy*, 2021. 288.
- [12] Ye, Z., et al., Thermo-economic and environmental analysis of various low-GWP refrigerants in Organic Rankine cycle system. *Energy*, 2020. 199.
- [13] Guillaume, L., et al., Performance of a radial-inflow turbine integrated in an ORC system and designed for a WHR on truck application: An

experimental comparison between R245fa and R1233zd. *Applied Energy*, 2017. 186: p. 408-422.

- [14] P. Varshil, Deshmukh D.. A comprehensive review of waste heat recovery from a diesel engine using organic rankine cycle[J]. *Energy Reports*, 2021, 7.
- [15] Song, J. and C.-w. Gu, Parametric analysis of a dual loop Organic Rankine Cycle (ORC) system for engine waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 2015. 105: p. 995-1005.
- [16] Shu, G., et al., Performance comparison and working fluid analysis of subcritical and transcritical dual-loop organic Rankine cycle (DORC) used in engine waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 2013. 74: p. 35-43.
- [17] Vaja, I. and A. Gambarotta, Internal Combustion Engine (ICE) bottoming with Organic Rankine Cycles (ORCs). *Energy*, 2010. 35(2): p. 1084-1093.