

---

DOI: 10.63527/1607-8829-2026-1-76-83

Зульфа Халіда (<https://orcid.org/0009-0000-4566-7261>),  
Девіна Роза Хендарті (<https://orcid.org/0009-0000-0343-6561>),  
Хідінг Кайоно (<https://orcid.org/0009-0006-6773-5599>),  
Юля Пуспа Деві (<https://orcid.org/0009-0002-1482-9947>),  
Хаді Рахмад (<https://orcid.org/0009-0009-3186-5609>)

Факультет машинобудування Державної політехніки Маланг Лінгкара,  
вул. Маскумамбанг, 1, Кедірі, Індонезія

Автор-кореспондент: Зульфа Халіда, e-mail: [zulfa.khalida@polineta.ac.id](mailto:zulfa.khalida@polineta.ac.id)

## Аналіз теплопередачі при гібридному охолодженні: парокомпресійному охолодженні (ПКХ) та термоелектричному охолодженні (ТЕО)

---

*Гібридний міні-холодильник поєднує в собі традиційне охолодження та термоелектричний холодильник. Звичайний холодильний пристрій використовує  $R-134a$  як робочу рідину та виробляє електроенергію з тепла, тоді як ТЕО працює від сонячної панелі. Це дослідження складається з двох методів: міні-холодильник, що використовує теплову енергію та сонячну панель. Результати показують, що внутрішня температура міні-охолоджувача, створювана за допомогою традиційної електроенергії, становить близько  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тоді як температура на стінці випарника досягає  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . У той час як міні-охолоджувач, що працює від сонячної панелі та використовує термоелектричний охолоджувач, демонструє швидке підвищення температури випарника, оскільки звичайна система охолодження вже вимкнена, тоді як температура всередині міні-охолоджувача швидко не підвищується.*

**Ключові слова:** теплопередача, гібридний міні-холодильник, термоелектричне охолодження, парокомпресійне охолодження, холодоагент  $R-134a$ , температура.

### Вступ

Явища теплопередачі є однією з постійних тем досліджень, особливо в холодильних системах. Традиційна холодильна система або парокомпресійна холодильна система (ПКХ) використовує робочу рідину-холодоагент для створення

---

**Citation:** Зульфа Халіда, Девіна Роза Хендарті, Хідінг Кайоно, Юля Пуспа Деві, Хаді Рахмад (2026). Аналіз теплопередачі при гібридному охолодженні: парокомпресійному охолодженні (ПКХ) та термоелектричному охолодженні (ТЕО). *Термоелектрика*, (1), 76–83. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2026-1-76-83>

Отримано: 06.01.2026; Переглянуто: 11.03.2026; Опубліковано: 31.03.2026

© 2026 Автори. Це стаття з відкритим доступом, що розповсюджується відповідно до умов ліцензії Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

охолодження. Ця система демонструє високий холодильний коефіцієнт (COP). В Індонезії виробництво холодильників значною мірою залежить від державної електроенергетичної компанії (теплової електростанції), що тягне за собою низку наслідків, таких як відключення електроенергії через технічне обслуговування та ремонт електромереж. Відключення електроенергії автоматично впливає на побутову електроніку, таку як домашній холодильник. Деякі використовують сонячні панелі для вирішення проблеми відключення електроенергії. Але проблема виникає через те, що ефективність сонячних панелей досить низька, і це створює труднощі для їх застосування для виробництва потужної електроніки, такої як компресор холодильника. Ця проблема призвела до проведення досліджень шляхом поєднання парокompресійного холодильного агрегату (ПКХ) з електромережею та термоелектричного охолодження (ТЕО), що генерується за допомогою сонячної панелі, і цей режим використовується для подолання наслідків відключення електроенергії.

Remeli та ін [1] провели дослідження охолодження Пельтьє в міні-охолоджувачі. Збір даних здійснювався шляхом вимірювання температури навколишнього середовища, температури повітря на вході та виході, а також температури гарячого та холодного елементів Пельтьє. Різниця між даними дослідження та моделювання становить приблизно 1 %. Це означає, що міні-охолоджувач може знизити температуру до 10 °C від початкової температури, а температура на гарячому кінці досягає 45 °C. Чим більший градієнт температури, тим кращі характеристики елемента Пельтьє. В результаті холодильний коефіцієнт дорівнює 0.5 при швидкості теплопередачі 25 Вт. У дослідженні було зазначено кілька важливих моментів, таких як рекомендований радіатор, в якому використовується теплова трубка з високоефективним елементом Пельтьє та радіатор з високою теплопровідністю.

Gao та ін. [2] провели дослідження дворівневого ТЕО (технічного обладнання) для досягнення оптимального зниження температури. Імпульсні струми подавались на гарячі та холодні частини двох рівнів ТЕО. Це дослідження призвело до того, що дворівневий ТЕО забезпечував нижчі температури та довший час роботи. Wang та ін. [3] провели дослідження ТЕО з використанням електродинамічного механізму. Деякі електронні пристрої під час роботи перегріваються, що впливає на їхню продуктивність. Для належного функціонування електронних пристроїв необхідне відведення тепла. Охолодження обладнання з використанням комбінації ТЕО та коронного повітряного охолодження (КПО) здійснюється на основі другого закону термодинаміки, а саме мінімізації джерел ентропії. Результати досліджень показують кращий ефект охолодження з високим холодильним коефіцієнтом (COP) шляхом встановлення КПО на гарячій стороні. Робоча температура в цьому дослідженні була < 80 °C з помірною вхідною потужністю, що робить дану схему придатною для обладнання з високим тепловим потоком. Huang та ін [4] провели дослідження маломасштабної системи охолодження з використанням термоелектричного охолоджувача (ТЕО). Як система управління використовувалася пропорційно-інтегрально-диференціальна (ПІД) система з мікросхемою управління MAX1978 для управління замкнутою системою охолодження.

Діапазон регульованої температури становив від 5 до 55 °С з точністю до 0.5 °С. Ця система має ряд переваг, таких як низьке енергоспоживання, безшумність та низький рівень забруднення. Халіда та ін [5] провели дослідження двигуна внутрішнього згорання, використовуючи ТЕО для збільшення вмісту O<sub>2</sub> з метою оптимізації продуктивності. Це дослідження показує, що ТЕО може підвищити продуктивність при низькій швидкості, але за високої швидкості ТЕО працює погано, оскільки йому потрібно більше часу для охолодження повітря.

Tian та ін. [6] провели дослідження продуктивності термоелектричного охолоджувача (ТЕО) як системи охолодження, зокрема, повітряно-водяного охолодження. Збір даних проводився з урахуванням витрати повітря, температури в приміщенні, потужності і т. д. Було проведено аналіз експлуатаційних витрат системи. Вартість системи охолодження з ТЕО становить від 0.7 до 1.4 доларів за 1 кВт·год. Оптимальні вимоги досягаються при вхідній потужності 23 Вт, коли результуючі витрати мінімальні.

У цьому дослідженні розроблено та проаналізовано гібридний парокompресійний холодильник з термоелектричним охолоджувачем (ТЕО) для розуміння теплопередачі в холодильнику, особливо при переході між режимами парокompресійного холодильника (ПКХ) та ТЕО. Дані для режимів ПКХ та ТЕО збиралися окремо та включали температуру, швидкість нагрівання тощо. В системі ПКХ в якості робочої речовини використовується холодоагент R-134a, оскільки він широко використовується в Індонезії, тоді як в системі ТЕО використовується холодоагент TEC 12706.

## Методи

Дане дослідження проводиться з використанням міні-холодильника розміром 50 x 50 x 50 см з термоелектричними охолоджувачами (ТЕО) ліворуч і праворуч. Міні-холодильник оснащений випарником, конденсатором, компресором, розширювальним клапаном і т. д. Як робоча речовина використовується холодоагент R-134a, а як ТЕО – комерційний TEC 12706. Для генерації ТЕО використовується сонячна панель потужністю 100 Вт. На Рис. 1 нижче представлена принципова схема гібридної холодильної установки.

Необхідне теплове навантаження визначається за допомогою закону теплопередачі, як у рівнянні 1. У цьому рівнянні  $\dot{m}$ ,  $c_p$ ,  $\Delta T$  – це маса рідини, питома теплоємність та температура. Елемент Пельтьє складається з двох різних частин, а саме холодної та гарячої сторін. Це відбувається завдяки ефекту Зеебека, оскільки через елемент Пельтьє проходить електричний струм. Тепло, що виділяється на гарячій та холодній сторонах, можна розрахувати за допомогою рівнянь 2 та 3.  $\dot{q}_c$ ,  $\dot{q}_h$ ,  $\alpha$ ,  $I$ ,  $R_p$ ,  $R$  – це тепло на холодній та гарячій сторонах, ефект Зеебека, струм, тепловий опір та електричний опір відповідно.

$$\dot{q} = \dot{m}c_p\Delta T \quad (1)$$

$$\dot{q}_c = \alpha IT - \frac{\Delta T}{R_p} - \frac{I^2 R}{2} \quad (2)$$

$$\dot{q}_h = \alpha IT - \frac{\Delta T}{R_p} + \frac{I^2 R}{2} \quad (3)$$

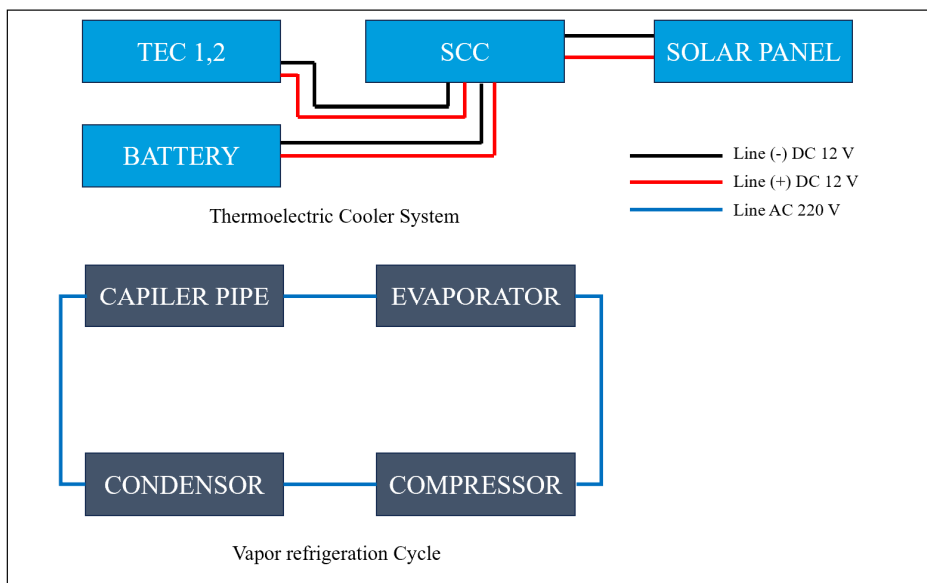


Рис. 1. Схема гібридного холодильника

### Результат та обговорення

Дані гібридного міні-охолоджувача збираються шляхом спостереження за внутрішньою температурою міні-охолоджувача, температурою гарячої та холодної сторін ТЕО, струмом та напругою. Струм, що проходить через один елемент Пельтьє, становить близько 4.58 А, а напруга – близько 11.7 В. Середня температура на гарячій стороні становить 29.8 °С, а на холодній – близько -3.6 °С, що досягається за 340 секунд.

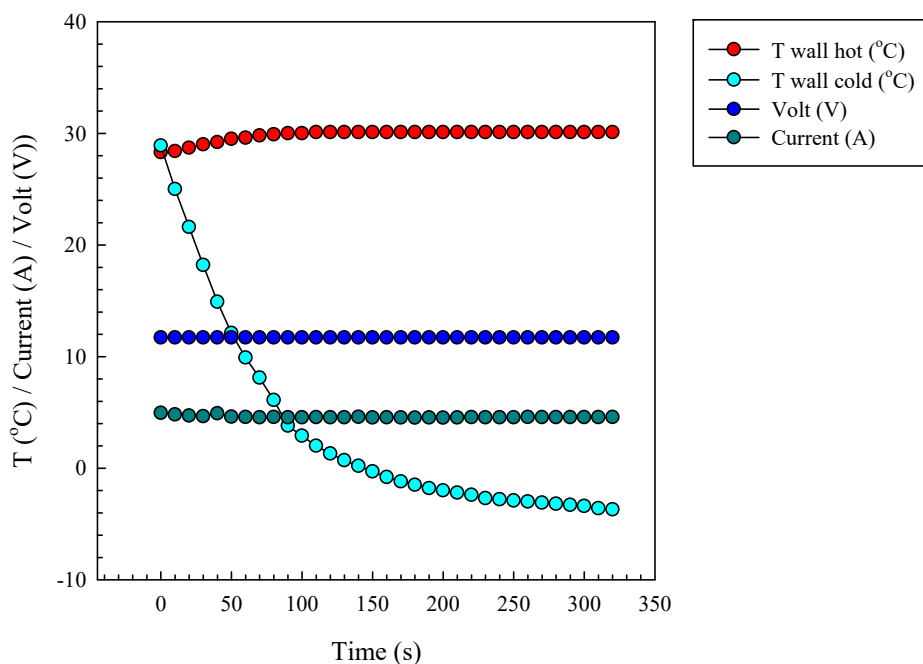


Рис.2. Дані одного TEC 1207

Виходячи з цих даних, можна побачити, що температура стінки гарячої сторони суттєво не підвищується. Тоді як температура стінки холодної сторони може короткочасно опускатися нижче 0 °С. Це відбувається завдяки належному відведенню тепла радіатором. ТЕС 12706 має коефіцієнт термоЕРС 53 мВ, електричний опір 1.8 Ом, термічний опір 1.8 К/Вт та теплоємність 15 Дж/К [7]. Ці умови ідеальні для ТЕО 1207, хоча фактичні умови можуть відрізнятись. Використовуючи закон Ома, отриманий опір становить приблизно 2.5 Ом. На зображенні нижче наведено схему ТЕС 12706, а параметри ТЕО можна використовувати для розрахунку швидкості нагріву на гарячій та холодній сторонах.

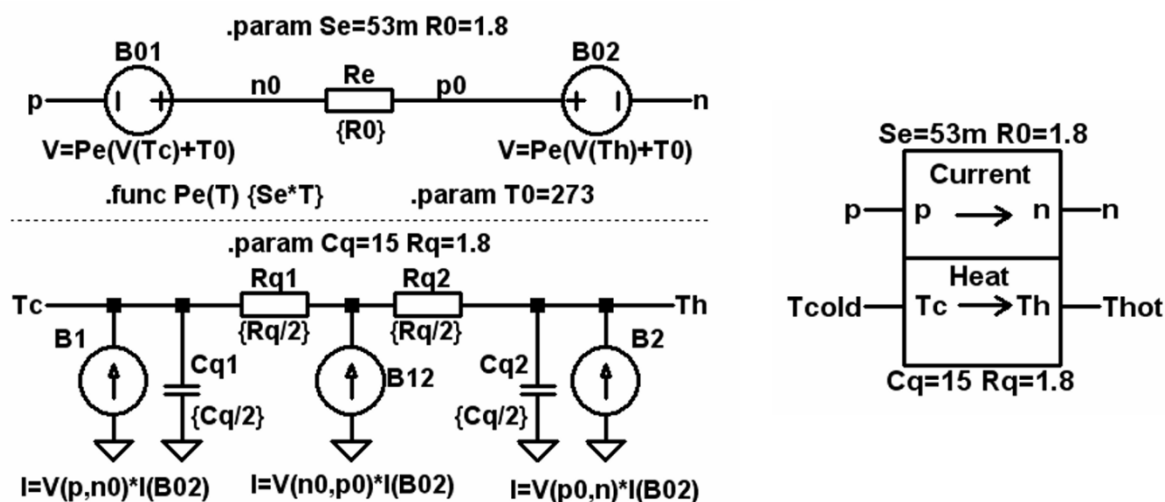


Рис. 3. Параметри ТЕС 12706 [7]

Після аналізу кількох параметрів, отриманих внаслідок збору даних, наступним кроком є розрахунок швидкості нагріву Пельтьє на холодній та гарячій сторонах. Швидкість нагріву на гарячій стороні практично збігається із швидкістю теплопередачі на холодному боці через рівновагу. Швидкість нагріву вища за більшої різниці між високою та низькою температурами. Виходячи з твердження Кукова [7], в ідеалі опір Пельтьє 12706 становить 1.8 Ом, але, виходячи з прямих вимірювань, опір становить близько 2.5 Ом. Це призводить до різниці у швидкості нагріву між ідеальними та реальними умовами, що становить близько 33 %. На Рис. 4 показано, що швидкість нагріву різко зростає, коли  $\Delta T$  становить близько 15 °С. Це відбувається через стрибок електричного струму, і зареєстрований струм при  $T = 15$  °С становить близько 4.9 ампер, тоді як середній електричний струм становить близько 4.5 ампер.

На Рис. 5 нижче показано внутрішню температуру гібридного міні-охолоджувача, що працює на традиційній електроенергії (тепловій енергії) і сонячній панелі. На початку роботи міні-охолоджувач використовує традиційну електроенергію і середня внутрішня температура досягає близько 22 °С, в той час як температура на стінці випарника становить 7 °С. Традиційна пароконденсійна система у міні-охолоджувачі працює добре, оскільки мінімальна температура досягається за 150 секунд. Однак теплопередача

всередині камери міні-охолоджувача потребує поліпшення, оскільки різниця температур між стінкою випарника та камерою міні-охолоджувача досить велика.

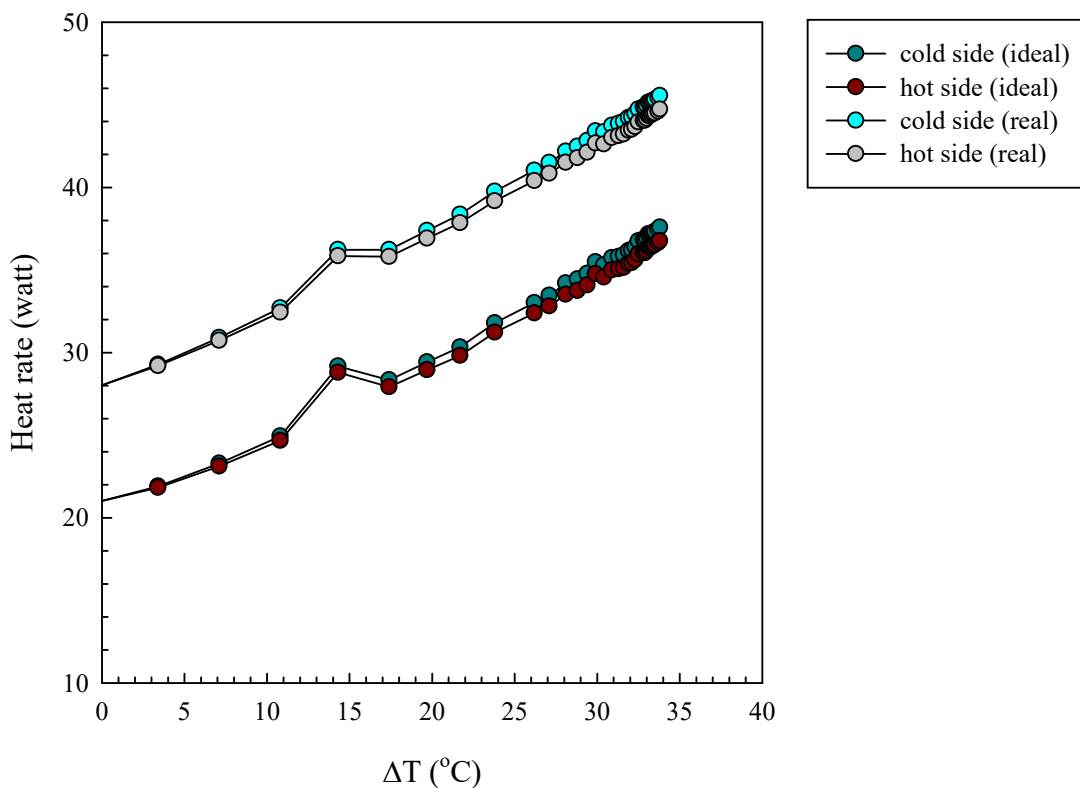


Рис. 4. Швидкість нагріву TEC 12706

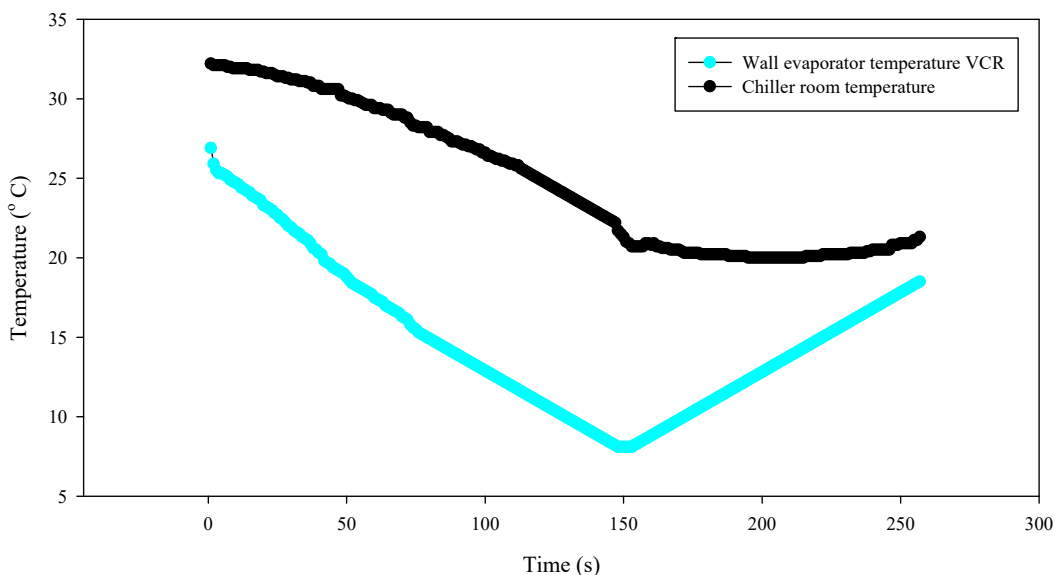


Рис. 5. Температура гібридного холодильника

Наступний елемент – міні-охолоджувач, який живиться від сонячної панелі через термоелектричний охолоджувач. На Рис. 5 показано швидке підвищення температури стінки випарника, оскільки ПКХ вже вимкнено, тоді як усередині міні-охолоджувача

швидкого підвищення температури не спостерігається. Температура стінки випарника швидко зростає через вимкнення компресора, що призводить до збільшення тепла, а отже, і до підвищення температури холодоагенту. Цю схему слід розглядати, оскільки компресор нагрівається, і можливо, варто враховувати додаткові вентилятори для охолодження компресора.

## Висновок

У даному дослідженні слід зазначити, що неправильна експлуатація термоелектричного охолоджувача може спричинити ефект Джоуля, тобто появу тепла на холодній стороні термоелектричного охолоджувача. Це небажана умова, коли електрична енергія створює високу температуру на холодній стороні. Це може статися, якщо радіатор та вентилятор на гарячій стороні не справляються з розсіюванням тепла. Таке гібридне охолодження забезпечується двома режимами: традиційним вакуумним компресором з холодоагентом R-134a та термоелектричним охолоджувачем (ТЕО). У режимі парокompресійного охолодження (ПКХ) температура всередині холодильника досягає приблизно 22 °С, а на стінці випарника – 7 °С. Другий режим, генерований сонячною панеллю через термоелектричний охолоджувач (ТЕО) після відключення системи ПКХ, показує, що температура всередині холодильника, як і раніше, досягає приблизно 22 °С, але температура на стінці випарника швидко підвищується. Для такого охолодження потрібна більша продуктивність батареї сонячної панелі, оскільки батарея швидко розряджається.

## Література

1. M. Fairuz Remeli, N. Ezzah Bakaruddin, S. Shawal, H. Husin, M. Fauzi Othman, and B. Singh (2020). Experimental study of a mini cooler by using Peltier thermoelectric cell, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, doi: 10.1088/1757-899X/788/1/012076.
2. Y. W. Gao, H. Lv, X. D. Wang, and W. M. Yan (2017). Enhanced Peltier cooling of two-stage thermoelectric cooler via pulse currents, *Int J Heat Mass Transf*, 114, 656–663, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.102.
3. J. Wang *et al.* (2021). Design and application of a cooling device based on Peltier effect coupled with electrohydrodynamics. *International Journal of Thermal Sciences*, 162, Apr. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106761.
4. H. Huang, S. Fu, P. Zhang, and L. Sun (2016). Design of a small temperature control system based on TEC, doi: 10.1109/ISCID.2016.50.
5. Z. Khalida H. Rahmad, Puspa Yulia, and K. Chandra (2024). Thermoelectric TEC untuk membantu meningkatkan massa oksigen pada proses pembakaran motor bakar, *Jurnal Permadi*, 6, (3), 238–245.
6. M. W. Tian, F. Aldawi, A. E. Anqi, H. Moria, H. S. Dizaji, and M. Wae-hayee (2021). Cost-effective and performance analysis of thermoelectricity as a building cooling system;

experimental case study based on a single TEC-12706 commercial module. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, doi: 10.1016/j.csite.2021.101366.

7. Kubov V.I. (2016). Peltier-Seebeck thermoelectric element TEC1-12706.

**Zulfa Khalida** (<https://orcid.org/0009-0000-4566-7261>),  
**Devina Rosa Hendarti** (<https://orcid.org/0009-0000-0343-6561>),  
**Hiding Cahyono** (<https://orcid.org/0009-0006-6773-5599>),  
**Yulia Puspa Dewi** (<https://orcid.org/0009-0002-1482-9947>),  
**Hadi Rahmad** (<https://orcid.org/0009-0009-3186-5609>)

Mechanical Engineering Department, State Polytechnics of Malang Lingkar,  
1 Maskumambang str., Kediri, Indonesia

### **Analysis of Heat Transfer of Hybrid Refrigeration: Vapour Compression Refrigeration (VCR) and Thermoelectric Cooling (TEC)**

*Hybrid Mini-cooler is combining the conventional refrigeration and thermoelectric cooler. The conventional refrigeration uses R-134a as working fluid and generated by using electricity from thermal power whereas TEC is generated by using solar panel. This research consists of two methods, those are mini-cooler generated by using thermal power and solar panel. The result shows the inside temperature of mini-cooler which generated by using conventional electricity around 22 °C whereas the temperature on evaporator wall reaches 7 °C. Whereas the mini-cooler which is generated by solar panel through TEC shows increasing wall evaporator temperature rapidly since conventional refrigeration system is already Off whereas the room inside of mini-cooler does not shows increasing temperature rapidly.*

**Keywords:** heat transfer, hybrid mini-cooler, thermoelectric cooling, vapour compression refrigeration, R-134a refrigerant, temperature.