

# Технико-экономическое моделирование и анализ электромобиля на солнечных батареях, заряжаемого с помощью системы хранения энергии с использованием аккумуляторных батарей (BESS) на острове Калимантан☆

Ариприхарта<sup>a,b,\*</sup>, Сатриа Адигуна<sup>a</sup>, Ариф Н. Афанди<sup>a,b</sup>, Мухаммад Кахью Багаскоро<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Кафедра электротехники и информатики, инженерный факультет, Государственный университет Маланга, Маланг 65145, Индонезия

<sup>b</sup> Центр усовершенствованных материалов и возобновляемой энергии (CAMRY UM), Индонезия

**Аннотация.** В данном исследовании рассматривается оптимальное сочетание солнечных панелей и емкости аккумуляторов в гибридных системах в 11 городах острова Борнео, используя значительный потенциал солнечной энергии региона и высокий уровень солнечной радиации. Исследование анализирует оптимальное сочетание солнечных панелей и емкости аккумуляторов в 11 городах Калимантана с использованием алгоритмов оптимизации роя частиц (PSO) и оптимизации стаей серых волков (GWO) для максимизации выработки энергии, снижения удельных затрат на энергию и максимального сокращения углеродосодержащих выбросов. Результаты показывают, что Таракан является наиболее оптимальным местом, генерирующим 215 804,88 кВт·ч при цене 916,9 индонезийских рупий/кВт·ч и снижающим выбросы на 435 884,29 кг CO<sub>2</sub>-э, в то время как Самаринда является наименее оптимальным местом. С экономической точки зрения, тарифы на электроэнергию в размере 2466,78 индонезийских рупий/кВтч и 2000 индонезийских рупий/кВтч обеспечивают положительную чистую приведенную стоимость (NPV) со сроком окупаемости (PP) 9-12 лет, в то время как тариф в размере 1500 индонезийских рупий/кВтч считается невыгодным. Результаты демонстрируют эффективность алгоритмов PSO и GWO в оптимизации системы возобновляемой энергии и подтверждают финансовую жизнеспособность проекта с положительной NPV и разумным сроком окупаемости. Внедрение систем возобновляемой энергии на острове Калимантан может повысить энергоэффективность и значительно сократить выбросы углерода, способствуя достижению целей экологической устойчивости.

**Ключевые слова:** Технико-экономический анализ; Электромобиль; Зарядное устройство для электромобилей; PSO; GWO.

## 0 Введение

Электроэнергия стала одной из основных потребностей человека, поскольку многие виды деятельности требуют этой энергии. В пресс-релизе Министерства энергетики и минеральных ресурсов от 15 января 2024 года сообщается, что среднее потребление электроэнергии на душу населения в Индонезии достигло 1285 кВт·ч [1].

С развитием этой технологии электроэнергетика также развивалась, и начала проникать в мир транспорта, что отмечено бурным ростом продаж и использования электромобилей, как двухколесных, так и четырехколесных. Согласно данным Databook, объем продаж электромобилей в Индонезии к концу 2023 года достиг 17,06 тыс. единиц. Это значение увеличилось на 65,2 % по сравнению с концом 2022 года [2]. В продажах электромобилей доминирует Hyundai Ioniq 5 Signature Long Range, продажи которого составили 6334 единицы, за ним следует Wuling Air EV Long Range с продажами в 3461 единицу [3]. Широкое использование электромобилей (EVs) считается способным сократить выбросы углекислого газа и транспортные расходы, а также улучшить качество воздуха в городских районах [4]. Эти экологически чистые транспортные средства предлагают потенциальную долгосрочную экономию для потребителей, что делает их привлекательным вариантом для людей, заботящихся о своем бюджете [5]. Поскольку города все

больше продвигают электрический транспорт, преимущества EVs, такие как снижение шумового загрязнения, становятся все более очевидными как для жителей, так и для политиков [6]. Этот переход к электрификации в транспортном секторе не только решает экологические проблемы, но и обеспечивает экономические преимущества и повышает общее качество жизни в городах [7]. Однако многие страны, включая Индонезию, по-прежнему используют угольные электростанции [8], поэтому переход на электромобили может быть полезнее для энергосбережения и сокращения выбросов. Кроме того, если на дорогах много электромобилей, их самостоятельная зарядка создаст дополнительную нагрузку на электросети [9].

Nomenclature	
Symbol	Description
$A_{PV}$	Solar panel surface area ( $m^2$ )
AC	Alternating current
BESS	Battery energy storage system
CAPEX	Capital cost
$C_t$	Total outgoing costs in year $t$ (Rp)
CPSO	Constrained Particle Swarm Optimization
$C_{Tbatt}$	Total battery capacity (kWh)
$C_{APEX}$	Cost of initial capital employed
$C_{F,N}$	Cash flow in period $N$
DoD	Depth of Discharge
DC	Direct Current
$E_{out}$	System output energy (kWh)
EV	Electric Vehicle
EVCS	Electric Vehicle Charging Station
EOM	Output Energy Maximization
$eCO_2$	Carbon emissions ( $kgCO_2e$ )
$E_f$	Carbon emission factor ( $0,757 kgCO_2/kWh$ )
$E_t$	Energy generated at time $t$ (kWh)
$E_p$	Energy generated (kWh)
$G$	Solar Irradiation ( $kWh/m^2$ )
GCPV	Grid-Connected Photovoltaic
GWO	Grey Wolf Optimization
$I_{Cbatt}$	Total Current of Battery Requirement (Ah)
LCOE	Levelized Cost of Energi (Rp/kWh)
$N_{PV}$	Number of Solar Panels
$N_{PV}$	Net Present value
$N$	Period of use of the project
$N_{batt}$	Total battery requirement
OD	Number of Days of Battery Autonomy
OPEX	Maintenance cost
$P_{PLTS}$	Solar panel capacity (kWp)
$P_d$	Load Power Used (kW)
$P_{inv}$	Inverter capacity (kW)
$P_p$	Payback period
PV	Photovoltaics
PSO	Particle Swarm Optimization
$r$	Discount ratio
$R$	Revenue or revenue (Rp)
RE	Renewable Energy
SF	Safety Factor (%)
SAM	System Advisor Model
SPKLU	Public Electric Vehicle Charging Stations
SGTCS	Solar-based grid-tied charging station
SoC	State of Charge
TOE	Ton of Oil Equivalent
$V_{batt}$	Battery module voltage (V)
$W_d$	Daily electrical energy required (Wh)
$W_s$	Planned Electricity Demand (Wh)
WT	Electric Vehicle Charging Station
$\eta_{inv}$	Inverter efficiency (%)
$\eta_{baterai}$	Battery efficiency (%)
$\eta_{pv}$	Solar Panel Efficiency

Согласно данным, содержащимся в «Индонезийском энергетическом прогнозе на 2023 год», использование первичной энергии в Индонезии достигло 246 миллионов тонн нефтяного эквивалента (ТОЭ), при этом уголь занимает 42 %, за ним следуют нефть (31 %) и газ (14 %) [10]. Использование возобновляемых источников энергии в этом объеме первичного энергоснабжения составляет всего 30 миллионов ТОЭ, или лишь 12,3 % от общего объема первичного энергоснабжения [11]. Общее использование возобновляемых источников энергии составляет всего 12,6 ГВт, что составляет лишь около 0,30 % от общего потенциала возобновляемых источников энергии в Индонезии. Его значение составляет 3687 ГВт, а потенциал солнечной энергии — 3294 ГВт. Интенсивность солнечного излучения в Индонезии может достигать  $4,8 kWh/m^2$  [12]. Такой уровень солнечной радиации наблюдается в течение всего года [13]. Солнечная энергия является наиболее широко доступным видом энергии. Благодаря обилию потенциала солнечной энергии, ее можно использовать в качестве варианта для выработки энергии для обеспечения работы зарядных станций для электромобилей, которые являются более экологичными [14].

Данное исследование поддержало инициативу правительства Индонезии по увеличению доли возобновляемых источников энергии до 31% к 2030 году [15]. В этой работе проводилось техническое моделирование и экономическая оценка системы солнечной электростанции, служащей источником энергии для зарядной станции электромобилей. Целью было оптимизировать использование фотоэлектрических панелей, батарей и электросети, учитывая такие критерии, как максимальная выходная мощность ( $E_{out}$ ), минимальная стоимость энергии (нормированная стоимость электроэнергии или LCOE) и максимальное сокращение выбросов  $eCO_2$ .

Анализ позволил получить представление о выходной энергетической мощности системы, связанных с ней затратах на электроэнергию и степени достигнутого сокращения выбросов вредных газов.

В данном исследовании рассматривается недостаток информации, касающийся применения алгоритмов PSO и GWO для оптимизации трех ключевых параметров: Eout, LCOE и eCO<sub>2</sub>. В отличие от этого, в предыдущем исследовании для технико-экономического анализа использовалось программное обеспечение HOMER 3.14, а в другом — программное обеспечение SAM [16-18].

Предполагается, что внедрение алгоритмов PSO и GWO в Python внесет значительный вклад в поиск оптимальных значений параметров технико-экономического анализа. В данном исследовании применение этих методов позволило достичь среднего значения Eout в 207 314,31 кВт·ч, среднего значения LCOE в 952,274 кВт·ч и среднего значения eCO<sub>2</sub> в 428 975,44 кг eCO<sub>2</sub>.

По состоянию на апрель 2024 года в Индонезии насчитывается 1380 общественных зарядных станций для электромобилей (SPKLU) [19], из которых только 54 расположены на острове Калимантан. Учитывая среднюю солнечную радиацию острова в 4,5863 кВт·ч/м<sup>2</sup>, существует значительный потенциал для использования солнечной энергии в качестве основного источника для зарядных устройств для электромобилей. Это может увеличить количество зарядных станций для электромобилей на острове Калимантан, особенно тех, которые используют экологически чистые источники энергии.

В данном исследовании представлено новое применение алгоритмов PSO и GWO для оптимизации систем зарядки электромобилей на основе фотоэлектрических панелей в 11 городах Калимантана, Индонезия. Предложенный подход обеспечивает улучшенные решения для достижения трех важнейших целей: максимизации Eout, минимизации LCOE и максимизации eCO<sub>2</sub>. Эта комплексная многоцелевая оптимизация в контексте разнообразных географических условий Калимантана представляет собой значительный шаг вперед в данной области, восполняя пробел в исследованиях по оптимизации систем возобновляемой энергии для инфраструктуры электромобилей на развивающихся рынках.

## **1 Сопутствующие работы**

Многочисленные научные исследования посвящены технико-экономическому анализу зарядных станций для электромобилей, работающих на солнечных фотоэлектрических системах. Например, в [20] интеграция электромобилей и фотоэлектрических систем в инфраструктуру распределения электроэнергии переживает рост из-за экологических опасений и снижения зависимости от ископаемого топлива [21]. Однако эта интеграция сталкивается с нерегулярным спросом на электроэнергию и колебаниями нагрузки [22], что требует эффективных стратегий управления и механизмов планирования [23]. В данном исследовании предлагается солнечная зарядная станция, подключенная к сети (SGTCS), для оптимизации зарядки электромобилей посредством планирования. В исследовании используется модель HOMER Grid, а на примере Исламабада проводится оценка годовых затрат, стоимости энергии, планирования зарядки электромобилей, сокращения потребления электроэнергии из сети и воздействия на окружающую среду.

В [24] растущие затраты, связанные с ископаемым топливом в транспортном секторе, могут усугубить опасения по поводу истощения запасов ископаемого топлива и выбросов в окружающую среду, тем самым способствуя внедрению электромобилей и требуя создания легкодоступной зарядной инфраструктуры. В данном исследовании анализируются проектирование и производительность использования крыши заправочной станции в качестве GCPV в Пакистане. Разработана система EVCS и проведено сравнение ее технико-экономических показателей с использованием SAM.

Исследование [25] рассматривает техническую и экономическую целесообразность внедрения гибридной энергетической системы, интегрирующей фотоэлектрические и ветроэнергетические технологии, для создания экологически устойчивой инфраструктуры зарядки электромобилей на пяти площадках в Китае. С помощью HOMER Pro 3.14 была определена оптимальная схема зарядных станций. Результаты показывают, что гибридные станции PV/WT/аккумулятор являются наилучшим решением, при этом Нанкин является наиболее экономичным, а Чжэнчжоу — наименее экономичным. Эти станции могут удовлетворить текущие потребности в зарядке, хотя анализ чувствительности показывает, что увеличение нагрузки или количества электромобилей снизит их производительность. Сбалансированное количество электромобилей может улучшить экономичность и производительность станции.

В [26] в этом исследовании оценивались технико-экономические и экологические последствия использования солнечной фотоэлектрической энергии для производства электроэнергии и водорода в пяти городских центрах Индии. Произведенного водорода было достаточно для заправки 20 водородных автомобилей в каждом из этих мест. Результаты показывают, что Калькутта имеет самый высокий объем производства водорода (82 054 кг/год), а Мумбаи — самую низкую стоимость водорода (3,00 долл. США/кг). Совокупное производство электроэнергии во всех городских районах составляет 25 ГВт·ч в год, что приводит к ежегодному сокращению выбросов CO<sub>2</sub> на 20 744 метрических тонны. Для сравнения, существует потенциал для дальнейшего сокращения на 2453 тонны в год за счет перехода от использования бензина к использованию водорода.

## 2 Метод

Данное исследование посвящено оптимизации систем зарядки электромобилей с использованием фотоэлектрических панелей и комбинации алгоритмов PSO и GWO для достижения максимальной выработки энергии, снижения затрат и уменьшения выбросов вредных газов. Зарядная станция включает два места, каждое мощностью 22 кВт, что обеспечивает полную ежедневную зарядку. Исследование проводилось в 10 крупных городах Калимантана и провинции Ибу-Кота-Нусантара (IKN). Благодаря интеграции этих передовых алгоритмов данный подход значительно повышает эффективность оптимизации фотоэлектрических систем, особенно в регионах с высоким солнечным потенциалом, превосходя традиционные методы, основанные на программном обеспечении.

На рис. 1 представлена принципиальная схема системы зарядки электромобиля от солнечной энергии, которая включает в себя солнечную систему, систему хранения энергии в виде батареи, инвертор в качестве преобразователя постоянного тока в переменный и нагрузку в виде зарядного устройства для электромобиля, подключенного к электросети. Для получения оптимальных значений E<sub>out</sub>, LCOE и выбросов углерода будут использованы алгоритмы PSO и GWO.

На рис. 2 представлена графическая схема технико-экономической модели зарядки электромобилей с использованием фотоэлектрических систем, оптимизированной с помощью алгоритмов PSO и GWO в Калимантане, а также сравнение рентабельности инвестиций при различных тарифах на электроэнергию и оптимизация мест зарядки в Самаринде.

В таблице 1 ниже представлены технические характеристики основных элементов, используемых в фотоэлектрической системе, включая фотоэлектрические модули, инвертор и аккумулятор. Эти параметры включают выходную мощность, напряжение, ток, КПД и стоимость для различных конфигураций каждого элемента, предоставляя обзор технических и экономических характеристик, необходимых для проектирования и анализа системы.

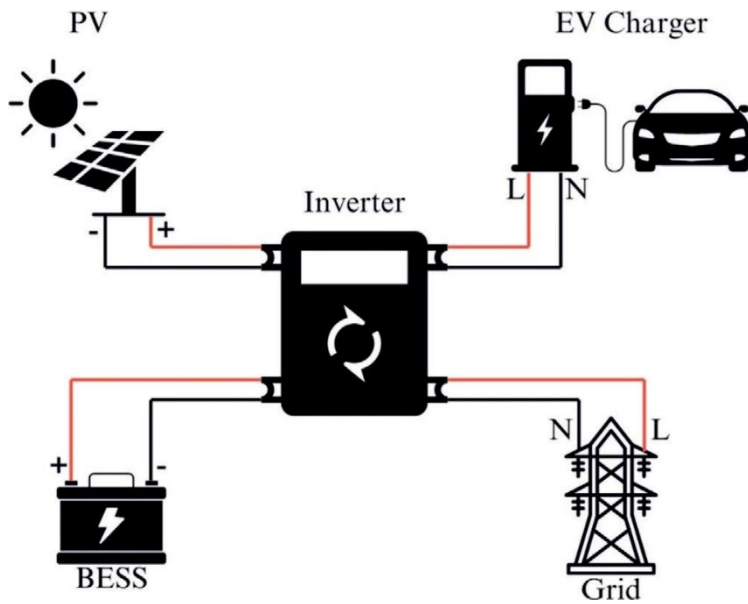


Рис. 1. Принципиальная схема системы

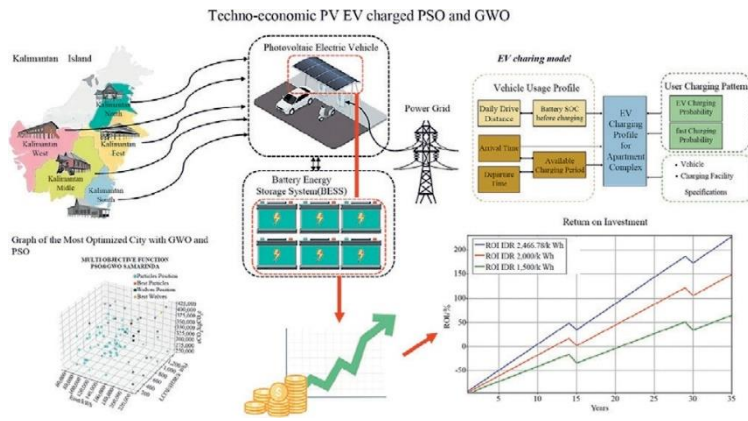


Рис. 2. Графическая схема.

Таблица 1

Технические характеристики элементов.

Components	Parameters	Specification		
		655 Wp	500 Wp	400 Wp
PV	Pmax	655 W	500 W	400 W
	Voc	45.2 V	51.5 V	37.07 V
	Isc	18.43 A	12.13 A	13.79 A
	Vmp	38.1 V	43.4 V	31.01 V
	Imp	17.20 A	11.53 A	12.9 A
	$\eta$	21.1 %	20.7 %	20 %
	Price	IDR	IDR	IDR
Inverter	Pin	5,132,000	3,576,975	1,909,200
	Power Factor	50,000 W		
Battery	$\eta$	0.8		
	Price	97.6 %	IDR 56,593,670	
	Rated capacity	100 Ah		
	Nominal voltage	48 V		
	Price	IDR 106,500		

Технические характеристики, представленные в Таблице 1, дают исчерпывающий обзор ключевых элементов, необходимых для фотоэлектрической системы [27-29]. Сравнивая различные конфигурации, становится проще выбрать наиболее подходящие компоненты на основе требований системы, производительности и стоимости, обеспечивая оптимальный баланс между эффективностью и доступностью в общей конструкции.

## 2.1 Технический анализ

1) Потребности в электроэнергии при техническом планировании допускают, что электрическая нагрузка на 25–40 % превышает используемое значение нагрузки, чтобы избежать увеличения электрической нагрузки на систему [30]. Потребности в электроэнергии можно рассчитать по следующему уравнению:

$$W_s = W_d + (W_d \times S_F) \quad (1)$$

$W_s$  — это планируемая потребность в электроэнергии,  $W_d$  — суточная потребность в электроэнергии, а  $S_F$  — коэффициент безопасности или допустимая величина потребления электроэнергии.

Ограничения нагрузки:

- Электрическая нагрузка системы, в частности зарядного устройства для электромобилей, ограничена мощностью зарядки (22 кВт) и временем работы (17 часов в сутки). Система должна избегать превышения этих эксплуатационных пределов, чтобы предотвратить перегрузку сети и обеспечить эффективную работу.

Ограничения сетевого взаимодействия:

- Для систем, подключенных к сети, необходимы эксплуатационные ограничения для управления обменом электроэнергией с сетью. Включает в себя ограничение максимальной экспортной и импортной мощности для предотвращения нестабильности сети.

2) Солнечные панели - солнечные элементы, изготовленные из полупроводниковых материалов, обладают способностью преобразовывать солнечное излучение в электрическую энергию [31]. Этот процесс преобразования необходим для использования возобновляемой энергии солнца [32]. Существует несколько типов солнечных панелей, которые различаются по материалу, из которого они изготовлены, один из которых — монокристаллический, имеющий КПД от 19 % до 25 % [33-36]. Для определения необходимой мощности фотоэлектрических модулей и количества фотоэлектрических модулей можно использовать следующее уравнение [37]:

$$P_{PLTS} = \frac{W_s}{G} + \left( L_{\text{losses}} \times \frac{W_s}{G} \right) \quad (2)$$

где  $P_{PLTS}$  — пиковая мощность солнечной электростанции,  $W_s$  — общая требуемая энергия, а  $G$  — средняя солнечная радиация в данном месте.

Количество энергии, производимой системой, на которое влияет солнечное излучение, можно определить с помощью уравнения, приведенного в ссылках [38,39]:

$$E_{\text{out}} = N_{PV} \times A_{PV} \times \eta_{PV} \times G \quad (3)$$

$E_{\text{out}}$  обозначает выходную энергию системы,  $N_{PV}$  - количество фотоэлектрических модулей,  $A_{PV}$  — площадь фотоэлектрических модулей,  $\eta_{PV}$  — эффективность панели, а  $G$  — солнечную радиацию.

Ограничения фотоэлектрической системы:

- Пиковое производство фотоэлектрической энергии системой ограничена солнечной радиацией, которая меняется в зависимости от местоположения и времени суток. Использовались данные об радиации из Global Solar Atlas, но система также должна учитывать эксплуатационные потери, вызванные изменениями температуры окружающей среды.

- Еще одно ограничение связано с мощностью инвертора, которая должна быть больше максимальной нагрузки, чтобы предотвратить перегрузку системы. В данной работе рассчитан допуск в 25 % на размер инвертора.

3) Инвертор функционирует как важнейшее устройство в системе, способное преобразовывать постоянный ток в переменный. Это преобразование достигается посредством процесса фильтрации и генерации синусоидального сигнала, обеспечивающего совместимость выхода электроэнергии со стандартными системами переменного тока [40,41]. Мощность инвертора в системе может быть рассчитана с помощью следующего уравнения:

$$P_{inv} = P_d \times \eta_{inv} + (P_d \times S_F \times \eta_{inv}) \quad (4)$$

$P_{inv}$  — требуемая мощность инвертора,  $P_d$  — потребляемая мощность нагрузки, а  $\eta_{inv}$  — КПД инвертора.

4) Система хранения энергии с использованием аккумуляторных батарей (BESS). BESS имеет решающее значение для систем возобновляемой энергии из-за их восприимчивости к климатическим и погодным изменениям. Таким образом, для обеспечения эффективного и стабильного использования энергии необходимо наличие системы хранения [42]. Однако принцип DoD ограничивает использование батарей 80 % емкости, а оставшиеся 20 % называются SoC [43,44]. Следующее уравнение позволяет рассчитать емкость батареи:

$$C_{Tbatt} = \frac{N_{OD} \times W_L}{D_{DoD} \times \eta_{batt}} \quad (5)$$

$$I_{Cbatt} = \frac{C_{tbatt}}{V_{batt}} \quad (6)$$

Ограничения аккумуляторной батареи:

- BESS работает с коэффициентом  $D_{DoD}$  85% для обеспечения долговечности и эффективности. Во избежание сбоев системы уровень заряда SoC не должен опускаться ниже этого порога.

- Также необходимо ограничить скорость зарядки и разрядки аккумулятора, чтобы предотвратить перегрев или перезарядку, которые могут повредить накопитель энергии.

## 2.2 Экономический анализ

Экономические и экологические ограничения являются важнейшими факторами, определяющими целесообразность и устойчивость системы. Эти ограничения определяют финансовые и экологические показатели системы, обеспечивая ее работу в допустимых пределах при одновременном обеспечении экономических выгод и минимизации вреда окружающей среде. Экономические ограничения относятся к финансовым показателям, оценивающим экономическую эффективность системы, в то время как экологические ограничения сосредоточены на влиянии системы на углеродосодержащие выбросы и ее вкладе в усилия по обеспечению устойчивости. Вместе эти ограничения образуют всеобъемлющую структуру, которая уравнивает экономическую целесообразность с экологической ответственностью, обеспечивая достижение системой финансовых и экологических целей.

Экономические и экологические ограничения:

- С точки зрения экономических ограничений, рентабельность системы оценивается на основе периода окупаемости и NPV, в то время как экологические ограничения сосредоточены на максимальном сокращении выбросов вредных газов, достижимом за счет оптимальной конфигурации системы.

1) Чистая приведенная стоимость (NPV) — это важнейший показатель в инвестиционном анализе, используемый для оценки финансовой жизнеспособности и прибыльности проекта. Она определяется путем суммирования всех ожидаемых денежных притоков и оттоков на протяжении всего срока реализации проекта с учетом временной ценности денег. Положительная NPV указывает на то, что проект, вероятно, будет приносить больше дохода, чем затрат, что делает его прибыльным. Напротив, отрицательная NPV предполагает, что затраты превышают выгоды, что делает проект финансово нежизнеспособным. Это делает NPV важным инструментом для оценки долгосрочных инвестиций [45]. Значение NPV можно определить по следующему уравнению [46-50]:

$$V_{NPC} = -C_{APEX} + \sum_{t=1}^N \frac{C_{F,N}}{(1+r)^t} \quad (7)$$

где  $C_{Tbatt}$  — общая емкость батареи,  $D_{DoD}$  — глубина разряда батареи,  $\eta_{batt}$  — КПД батареи,  $I_{Tbatt}$  — общий ток батареи,  $V_{batt}$  — напряжение батареи, а  $N_{OD}$  — количество автономных дней работы от батареи.

NPV обозначает чистую приведенную стоимость,  $C_{APEX}$  обозначает капитальные затраты,  $C_{F,N}$  обозначает денежный поток,  $N$  обозначает срок жизни проекта, а  $r$  — дисконтная процентная ставка.

2) Период окупаемости ( $P_p$ ) измеряет продолжительность, необходимую для того, чтобы проект окупил свои первоначальные капиталовложения за счет денежных поступлений или доходов [51,52].  $P_p$  можно рассчитать с помощью следующей формулы:

$$P_p = \frac{C_{APEX}}{R} \quad (8)$$

где  $P_p$  — период окупаемости,  $C_{APEX}$  — стоимость используемого капитала, а  $R$  — выручка или доход.

3) Нормированная стоимость энергии (LCOE) представляет собой стоимость электроэнергии на протяжении всего срока службы проекта и обычно используется для оценки целесообразности и конкурентоспособности проекта. Она включает в себя все расходы, связанные со строительством, эксплуатацией и обслуживанием системы производства энергии [53]. Для определения значения LCOE можно использовать уравнение [54,55]:

$$C_{LCOE} = \frac{C_{APEX} + \sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (9)$$

$C_{LCOE}$  — это нормированная стоимость энергии,  $C_{APEX}$  — стоимость затраченных капитальных вложений,  $C_t$  — общие исходящие затраты в году  $t$ ,  $r$  — коэффициент дисконтирования, а  $E_t$  — количество энергии, произведенной в момент времени  $t$ .

### 2.3 Экологический анализ

1) Углеродосодержащие выбросы — это выхлопные газы, производимые традиционными системами производства электроэнергии и традиционными транспортными системами, и эти

выбросы могут значительно ухудшить качество воздуха и способствовать деградации окружающей среды [56]. Для расчета количества таких выбросов, производимых генерирующей системой, можно использовать уравнение [57,58,59]:

$$E_{CO_2} = E_p \times E_f \quad (10)$$

согласно уравнению,  $E_{CO_2}$  представляет собой выброс вредных газов,  $E_p$  обозначает произведенную энергию, а  $E_f$  — коэффициент выбросов углерода, равный 0,757 kgCO<sub>2</sub>e кВт·ч [60].

## 2.4 Целевая функция

### 1) Многоцелевая оптимизация

В данном исследовании применяется многоцелевой подход к оптимизации для улучшения производительности системы зарядки PV EV, основанный на трех главных целях: выходная энергия  $E_{out}$ , минимизация LCOE и eCO<sub>2</sub>. Использование двух алгоритмов оптимизации, PSO и GWO, позволяет достичь сбалансированного оптимального решения для всех трех целей. а) Максимизация выходной энергии (EOM): первая цель — максимизировать энергию, вырабатываемую фотоэлектрической системой, чтобы гарантировать, что система может обеспечить достаточное количество энергии для работы зарядной станции электромобилей [61]. Эта целевая функция учитывает среднюю солнечную радиацию на исследуемом участке, эффективность солнечных панелей и конфигурацию системы хранения энергии с использованием аккумуляторных батарей (BESS).

Целевая функция:

$$Maximize E_{out} = \eta_{PV} \times N_{PV} \times A_{PV} \times G \quad (11)$$

где:

$\eta_{PV}$  = эффективность солнечных панелей

$N_{PV}$  = количество фотоэлектрических модулей

$A_{PV}$  = площадь фотоэлектрического модуля

$G$  = солнечное излучение

б) Минимизация нормированной стоимости энергии (LCOE) измеряет общую стоимость производства энергии за весь срок службы системы. Она оптимизирует капитальные затраты (CAPEX), затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание (OPEX) и количество энергии, производимой системой за определенный период времени [62]. Эта цель направлена на достижение минимально возможной стоимости энергии, тем самым повышая экономическую целесообразность проекта.

Целевая функция:

$$Minimize LCOE = \frac{C_{APEX} + \sum C_{OPEX,t}}{\sum E_t} \quad (12)$$

где:

$C_{APEX}$  = стоимость капитала;

$C_{OPEX, t}$  = эксплуатационные и ремонтные расходы в год.

$E_t$  = произведенная энергия в году  $t$

в) Максимизация сокращения выбросов углерода (eCO<sub>2</sub>): эта целевая функция направлена на максимизацию сокращения выбросов CO<sub>2</sub> за счет использования возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия, вместо ископаемого топлива. Эта функция рассчитывает, сколько выбросов CO<sub>2</sub> можно избежать при использовании возобновляемых источников энергии.

Целевая функция:

$$\text{Maximize } eCO_2 = E_{\text{out}} \times E_f \quad (13)$$

где:

$E_{\text{out}}$  = энергия, вырабатываемая системой.

$E_f$  = коэффициент выбросов углерода при использовании традиционных источников энергии (кг CO<sub>2</sub>/кВт·ч).

В данном исследовании применяются алгоритмы PSO и GWO для определения оптимального сочетания пиковой мощности при оптимальном количестве солнечных панелей и батарей. Цель состоит в получении максимального значения выходной энергии  $E_{\text{out}}$ , минимальной стоимости энергии LCOE и максимального сокращения выбросов углерода  $E_{\text{CO}_2}$ . Таким образом, целевая функция, которую необходимо достичь в данном исследовании, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} & (a \times (N_{\text{PV}} \times A_{\text{PV}} \times \eta_{\text{PV}} \times G)) \\ & - \left( \beta \times \left( \frac{C_{\text{APEX}} + \sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_t}{(1+r)^t}} \right) \right) \\ & + (\delta \times (E_p \times E_f)) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{Subject to } \begin{cases} N_{\text{PV}} \leq 164 \\ N_{\text{batt}} \leq 70 \\ E_{\text{PV}} \geq \text{Energy needed} \\ C_{\text{LCOE}_{\text{PLTS}}} < C_{\text{LCOE}_{\text{SPLTU}}} \\ E_{\text{CO}_2\text{PLTS}} > E_{\text{CO}_2\text{Grid}} \end{cases} \quad (15)$$

## 2.5 Области проведения исследований

Данное исследование сосредоточено на 11 крупных городах Калимантана, включая Банджармасин, Баликпапан, Понтианак, Самаринда, Паланка Рая и ИКН, выбранных за их высокий потенциал солнечной энергии и средний уровень солнечной радиации. Данные об радиации были получены из Международного солнечного атласа. Рис. 3.

На рис. 3 показаны различные значения радиации в областях проведения исследования: самое высокое значение зафиксировано в Таракане, где оно составляет 1737 кВт·ч/м<sup>2</sup>/год, а самое низкое — в Самаринде, где оно составляет 1571,7 кВт·ч/м<sup>2</sup>/год.

В таблице 2 приведены координаты каждой области проведения исследования, а также соответствующие данные о суточном и годовом уровне облучения. В 11 местах среднесуточное облучение составляет 4,5863 кВт·ч/м<sup>2</sup>, а среднее годовое облучение — 1674 кВт·ч/м<sup>2</sup>.

Индекс прозрачности, используемый в модели Лю-Джордана-Кляйна для количественной оценки солнечной радиации, достигающей поверхности Земли с верхних слоев атмосферы, варьируется от 0 до 1. Значение 1 означает отсутствие потери радиации (всё излучение — прямой луч), а 0 указывает на полную облачность без радиации [63,64].

На рис. 4 представлен коэффициент индекса прозрачности для каждой из 11 областей исследования, в среднем равный 0,5058. Это значение указывает на то, что на местах исследования наблюдается

небольшая облачность, но они остаются весьма подходящими для установки солнечных панелей [54].

Эффективность фотоэлектрических систем также зависит от температуры окружающей среды,

снижаясь на 0,4–0,65% на каждый 1 °C при каждом повышении температуры выше стандартных

тестовых условий (STC), равной 25 °C [43,65].

На рис. 5 представлен график изменения температуры окружающей среды за месяц для каждой местности исследования. На всех 11 исследованных участках средняя температура окружающей

среды колеблется от 26,8°C до 27,3 °C, что считается благоприятным для оптимизации эффективности фотоэлектрических систем [66]. Кроме того, на рисунке показано повышение температуры окружающей среды в мае и октябре во всех исследуемых областях.

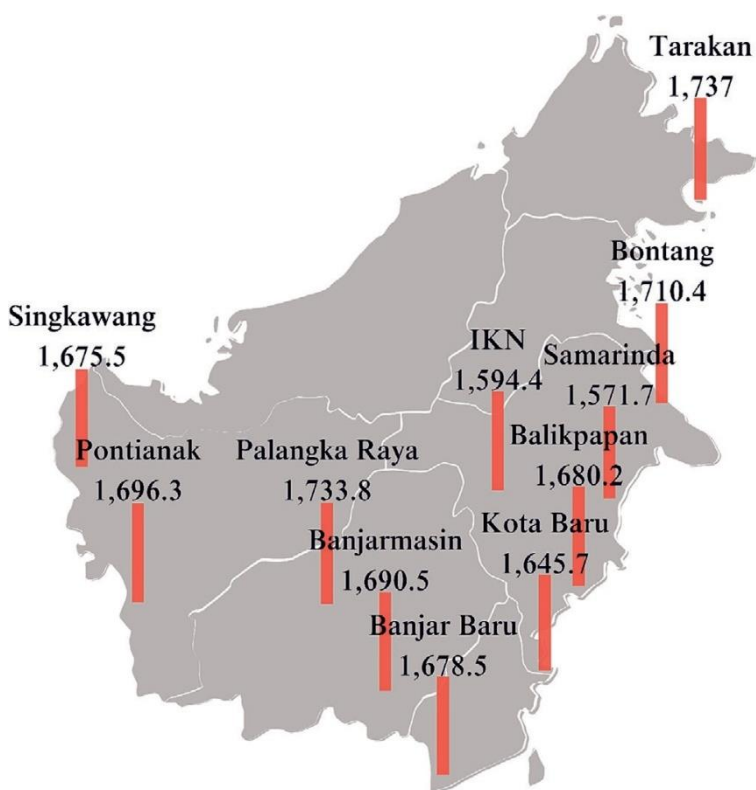


Рис. 3. Данные о годовой солнечной радиации в 11 областях исследования (кВт·ч/м²).

## 2.6 Прогнозирование годовой нагрузки

В этом разделе представлен прогноз годовой нагрузки для зарядной станции для электромобилей, работающей на солнечной энергии, максимальная мощность которой составляет 22 кВт в двух точках, и которая работает 17 часов в сутки с 7:00 до 24:00. При условии полной загрузки станция может обеспечить ежемесячную нагрузку приблизительно в 22 440 кВт·ч. Однако ежедневное потребление варьируется в зависимости от праздничных сезонов в июне-июле и декабре-январе. Прогноз годовой нагрузки представлен на рис. 6.

## 3 Обсуждение результатов

### 3.1 Технической анализ

1) Потребности зарядной станции в электроэнергии. В данном исследовании зарядная станция спроектирована с номинальной мощностью 22 кВт на одну точку зарядки. При одновременной работе двух точек зарядки станция может обеспечить суммарную мощность 44 кВт в час. Зарядные станции будут установлены в торговых центрах (ТЦ), где они могут работать с 7:00 до 12:00 (17 часов), поэтому суточное потребление энергии на одну точку составляет 374 000 Вт·ч или 374 кВт·ч. С учетом (1) значение потребляемой электроэнергии  $W_s$  составляет 486 200 Вт·ч.

2) Мощность солнечной электростанции. В данном исследовании солнечная электростанция спроектирована для обеспечения нагрузки в течение 6 часов в сутки, с 9:00 до 15:00, на каждой зарядной точке. Таким образом, потребность в энергии за эти 6 часов составляет 132 000 Вт·ч. С учетом (1) потребность в электроэнергии для фотоэлектрической системы  $W_{SPV}$  составляет 171 600 Вт·ч. Среди 11 областей исследования средняя солнечная радиация составляет 4,5863 кВт·ч/м<sup>2</sup>. Тогда с учетом (2) мощность солнечной электростанции  $P_{PVT}$  на одну точку составляет 45 кВт·ч.

Таблица 2

Координаты области и данные об облучении.

Cities	Location Coordinates	Daily Irradiation/(kWh/m <sup>2</sup> /day)	Annual Irradiation/(kWh/m <sup>2</sup> /year)
Banjarmasin	-03.2975°, 114.585278°	4.632	1,690.5
Balikpapan	-01.275°, 116.856111°	4.603	1,680.2
Pontianak	00.000556°, 109.322222°	4.647	1,696.3
Samarinda	-00.526667°, 117.115278°	4.306	1,571.7
Palangka Raya	-02.207222°, 113.916389°	4.75	1,733.8
Tarakan	03.3°, 117.633056°	4.759	1,737
Banjarbaru	-03.42509°, 114.87998°	4.599	1,678.5
Singawang	00.906944°, 108.988889°	4.59	1,675.5
Bontang	00.123611°, 117.471667°	4.686	1,710.4
Kota Baru	-02.795°, 115.971389°	4.509	1,645.7
IKN	-00.973889°, 116.701667°	4.368	1,594.4

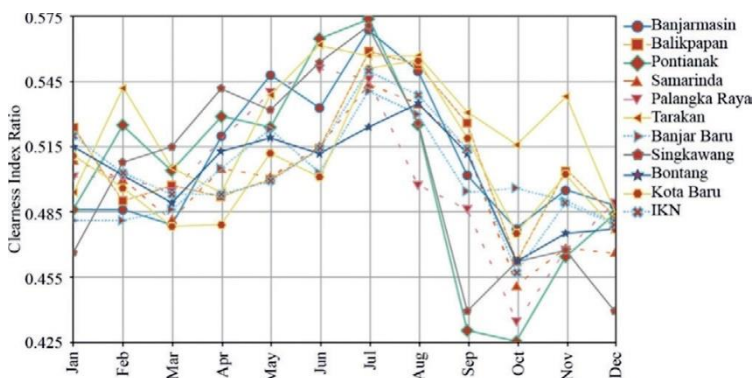


Рис. 4. Ежемесячный индекс прозрачности атмосферы в каждой области исследования.

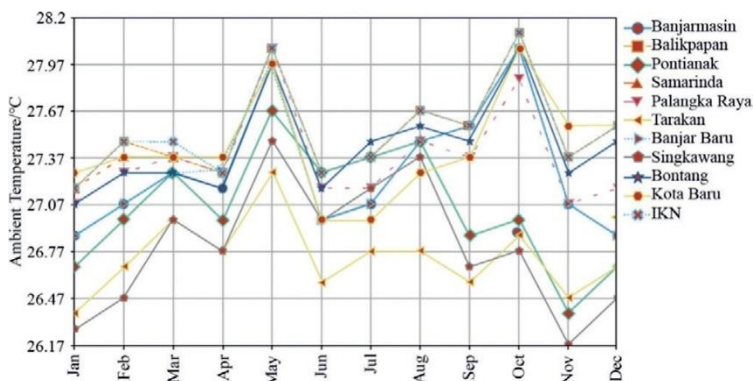


Рис. 5. Ежемесячная температура окружающей среды.

3) Мощность инвертора. В данном исследовании для расчета используется допуск 20 % при КПД инвертора 95 %. Таким образом, при (4) мощность инвертора  $P_{inv}$  составляет 25 кВт.

4) Потребности в энергии аккумуляторной батареи. В данном исследовании аккумуляторная батарея выступает в качестве элемента хранения энергии, который будет обеспечивать нагрузку в течение 5 часов, начиная с 15:00 до 20:00. При использовании коэффициента безопасности 25 %, с учетом (1) потребность в электроэнергии для батареи  $W_{sbatt}$  составляет 137 500 Вт·ч.

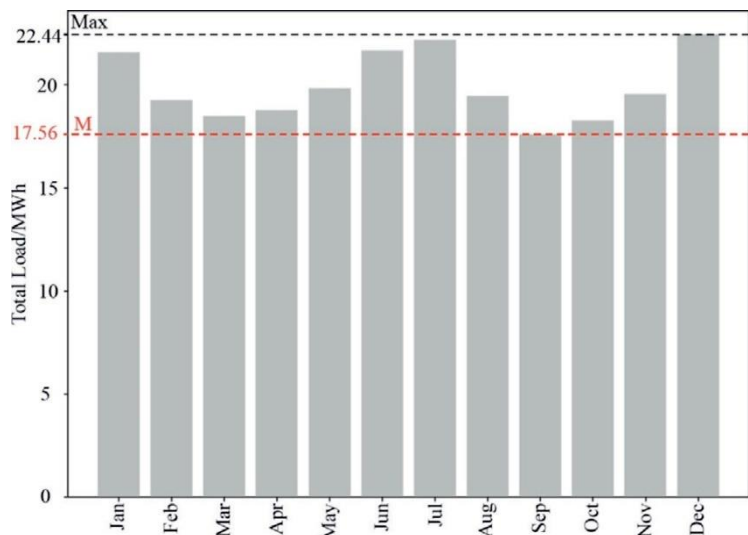


Рис. 6. Прогнозирование годовой нагрузки.

В данном исследовании используется аккумуляторная батарея типа  $LiFePO_4$ , которая имеет глубину разряда 85% и эффективность 98%. Таким образом, при (5) емкость батареи на точку  $C_{Tbatt}$  составляет 165 066 Вт·ч, а при (6) текущая емкость батареи на точку  $I_{Cbatt}$  составляет 3 438,875 А·ч.

### 3.2 Результаты оптимизации системы

В данном исследовании для достижения трех основных целей используются передовые алгоритмы оптимизации: максимизация выходной энергии системы, минимизация затрат на энергию и максимальное сокращение выбросов вредных газов. В частности, были выбраны алгоритмы PSO и GWO за их надежность и эффективность в решении сложных задач оптимизации. Они реализованы на языке Python для определения оптимальных значений трех целевых функций.

Для всесторонней оценки эффективности двух алгоритмов оптимизации в данном исследовании проводится подробное сравнение результатов, полученных с помощью алгоритмов PSO и GWO. Результаты моделирования для обоих алгоритмов систематически анализируются и представлены в таблице 3, где показана относительная эффективность и результативность каждого алгоритма в оптимизации параметров исследуемой системы.

Таблица 3

Данные результатов моделирования.

Algorithms	Max Iter	$P_{PV}/Wp$	$N_{PV}/pcs$	$I_{Cbatt}/Ah$	$N_{batt}/pcs$	$E_{out}/kWh$	LCOE/(IDR/kWh)	$eCO_2/(kgCO_2e)$
Banjarmasin								
PSO	150	655	138	100	70	144,919.13	942.13	364,055.78
GWO	150	655	138	100	70	206,459.97	1,001.79	423,513.76
CPSO	150	655	138	100	70	152,305.68	989.257	379,263.49
Balikpapan								
PSO	150	655	138	100	70	144,036.15	947.9	363,387.37
GWO	150	655	138	100	70	208,748.05	1,007.94	430,542.27
CPSO	150	655	138	100	70	150,873.54	995.34	381,564.89
Pontianak								
PSO	150	655	138	100	70	145,416.34	938.9	364,432.17
GWO	150	655	138	100	70	210,748.31	998.37	432,056.47
CPSO	150	655	138	100	70	152,678.51	985.67	381,654.83
Samarinda								
PSO	150	655	138	100	70	134,734.93	1,013.34	356,346.34
GWO	150	655	138	100	70	195,268.008	1,077.52	420,337.88
CPSO	150	655	138	100	70	142,542.68	1,063.86	371,564.72
Palangka Raya								
PSO	150	655	138	100	70	148,631.05	918.59	366,865.7
GWO	150	655	138	100	70	215,407.31	976.78	435,583.34
CPSO	150	655	138	100	70	156,782.41	961.23	382,691.98
Tarakan								
PSO	150	655	138	100	70	148,905.37	916.9	367,073.36
GWO	150	655	138	100	70	215,804.88	974.98	435,884.29
CPSO	150	655	138	100	70	156,850.29	955.32	382,926.49
Banjar Baru								
PSO	150	655	138	100	70	143,890.42	948.86	363,277.05
GWO	150	655	138	100	70	208,536.84	1,008.96	430,382.39
CPSO	150	655	138	100	70	150,945.89	991.54	381,789.39
Singkawang								
PSO	150	655	138	100	70	143,633.24	950.56	363,082.36
GWO	150	655	138	100	70	208,164.12	1,010.77	430,100.24
CPSO	150	655	138	100	70	150,795.51	997.97	378,456.12
Bontang								
PSO	150	655	138	100	70	146,625.07	931.16	365,347.18
GWO	150	655	138	100	70	212,500.09	990.14	433,382.57
CPSO	150	655	138	100	70	153,928.46	977.22	383,614.94
Kota Baru								
PSO	150	655	138	100	70	141,078.62	967.77	361,148.52
GWO	150	655	138	100	70	200,731.57	1,029.07	424,473.8
CPSO	150	655	138	100	70	148,835.43	1,015.63	378,206.95
IKN								
PSO	150	655	138	100	70	136,680.89	998.91	357,819.44
GWO	150	655	138	100	70	198,088.26	1,062.18	422,472.8
CPSO	150	655	138	100	70	143,512.85	1,045.86	375,860.91

Представлены данные сравнительного анализа различных алгоритмов оптимизации (PSO, GWO, CPSO), применяемых к системе зарядки электромобилей на основе фотоэлектрических панелей с системой BESS в различных областях Калимантана. Параметры, такие как мощность фотоэлектрических панелей и количество аккумуляторных батарей, остаются постоянными во всех вариантах моделирования для обеспечения справедливого сравнения. Алгоритм GWO неизменно обеспечивает самую высокую выходную мощность ( $E_{out}$ ), с показателями от 195 268,008 кВт·ч в Самаринде до 215 804,88 кВт·ч в Таракане, превосходя алгоритмы PSO и CPSO. Однако такая высокая выработка энергии имеет свою цену, поскольку алгоритм GWO часто связан с более высокой нормированной стоимостью энергии (LCOE).

Данные показывают, что GWO стабильно обеспечивает более значительное сокращение выбросов  $CO_2$ , чем другие алгоритмы, что свидетельствует о лучшей общей энергоэффективности. Например, в Банджармасине GWO приводит к выбросам 423 153,76 кг  $CO_2e$ , что значительно выше, чем 364 055,78 кг  $CO_2e$  у PSO. Эта тенденция наблюдается в нескольких местах, таких как Баликпапан и Понтианак, где GWO превосходит PSO и CPSO в сокращении выбросов  $CO_2$  за счет генерации большего количества чистой энергии. Таким образом, GWO более эффективен в снижении зависимости от традиционных источников энергии и сокращении выбросов, что делает его лучшим выбором для проектов, ориентированных на максимизацию экологических преимуществ.

С другой стороны, алгоритм PSO оказывается наиболее экономически эффективным, стабильно обеспечивая самые низкие значения LCOE в большинстве регионов, например, 995,34 индонезийских рупий/кВтч в Баликпапане и 985,67 индонезийских рупий/кВтч в Понтианаке. Это

делает PSO предпочтительным выбором для проектов, в которых приоритет отдается экономической эффективности. CPSO, в свою очередь, занимает промежуточное положение, демонстрируя умеренные показатели с точки зрения стоимости. Хотя он не достигает самых низких значений LCOE, он предлагает сбалансированную альтернативу между экономической эффективностью и производительностью системы в различных областях.

На основе результатов моделирования, GWO обеспечивает более высокую выходную мощность (Eout) в большинстве мест. Это означает, что GWO более эффективен в оптимизации производства энергии в районах с высоким потенциалом солнечной энергии, таких как Таракан, где годовая солнечная радиация составляет 1737 кВт·ч/м<sup>2</sup>/год. Однако, GWO имеет более высокую LCOE, чем PSO, что означает, что использование GWO может быть менее экономичным, если основной целью является минимизация затрат на энергию.

Исследование выявило значительные географические различия в производительности системы в разных городах: в районах с более низким уровнем солнечной радиации, таких как Самаринда (1571,7 кВт·ч/м<sup>2</sup>/год), наблюдается снижение производства энергии и увеличение затрат на электроэнергию как для алгоритма PSO, так и для алгоритма GWO, что подчеркивает критическую важность оценки солнечного потенциала при планировании проектов; напротив, в таких местах, как Таракан, наблюдаются оптимальные условия для внедрения фотоэлектрических систем благодаря более высокому уровню солнечной радиации, что приводит к увеличению выработки энергии и снижению затрат на электроэнергию.

На рис. 7 представлены результаты моделирования, сравнивающие наиболее и наименее оптимальные города, выявленные в ходе исследования. Таракан, с годовой солнечной радиацией 1737 кВт·ч/м<sup>2</sup>, выделяется как наиболее оптимальная область. Этот высокий уровень радиации позволяет Таракану производить 215 804,88 кВт·ч энергии при заметно низкой стоимости 916,9 индонезийских рупий/кВт·ч. Кроме того, Таракан добивается существенного сокращения выбросов вредных газов, составляющего 435 884,29 кг CO<sub>2e</sub>. Эти результаты подчеркивают исключительную пригодность Таракана для внедрения фотоэлектрических систем, что делает его наиболее благоприятным местом в исследовании как с точки зрения экономической эффективности, так и с точки зрения воздействия на окружающую среду.

С другой стороны, Самаринда, с самым низким годовым уровнем солнечной радиации в 1571,7 кВт·ч/м<sup>2</sup>, была признана наименее оптимальным местом для данного исследования. Она способна производить всего 195 268,01 кВт·ч энергии при стоимости энергии 1013,34 индонезийских рупий/кВт·ч и может сократить выбросы вредных газов лишь на 420 337,88 кг CO<sub>2e</sub>.

### **3.3 Экономический анализ**

Используя данные о продажах, представленные на рис. 6, экономический анализ данного исследования охватывает три варианта моделирования, различающиеся вариациями продажной цены электроэнергии за кВт·ч. Чтобы быть конкурентоспособными по сравнению с системой SPKLU PLN, тарифы на электроэнергию в этой системе начинаются от 2466,78 индонезийских рупий за кВт·ч (эквивалентно тарифу SPKLU), 2000 индонезийских рупий за кВт·ч и 1500 индонезийских рупий за кВт·ч.

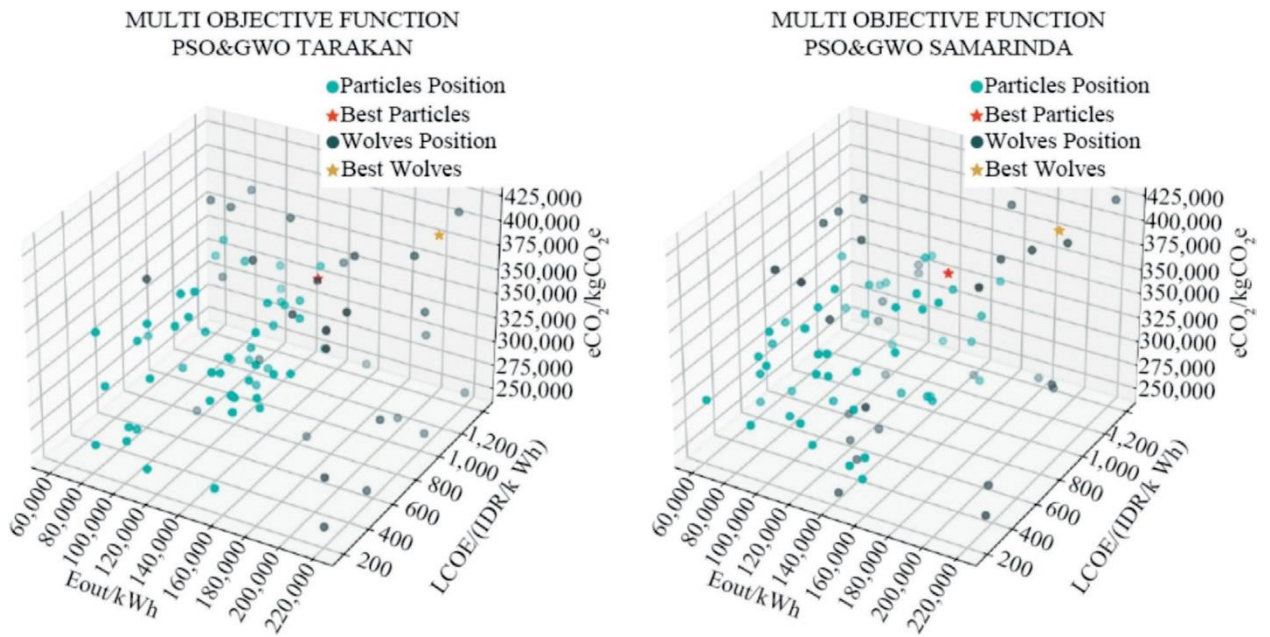


Рис. 7. График наиболее и наименее оптимизированного города.

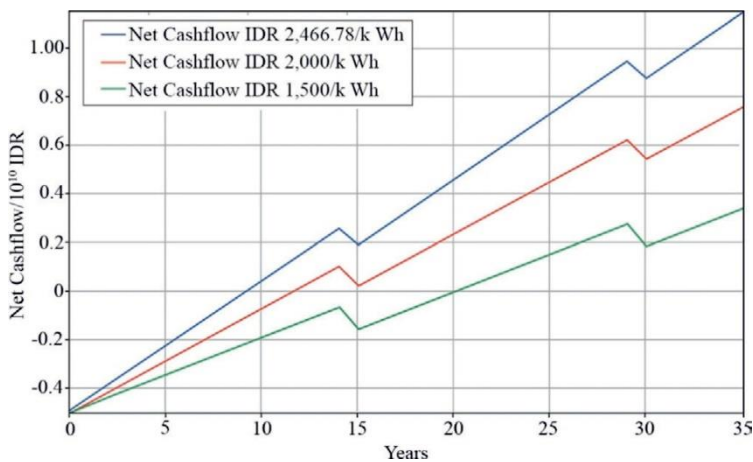


Рис. 8. График чистого денежного потока.

1) Чистая приведенная стоимость (NPV). С учетом разницы в тарифах на продажу электроэнергии будут получены 3 результата NPV. На рис. 8 показан чистый денежный поток за период реализации проекта. Из 3 вариантов моделирования видно, что тариф в размере 2466,78 индонезийских рупий/кВт·ч обеспечивает больший годовой доход по сравнению с двумя другими вариантами моделирования. Однако тариф будет таким же, как и в случае с SPKLU, поэтому лучше использовать тариф в размере 2000 индонезийских рупий/кВт·ч, поскольку полученный доход все еще больше по сравнению с тарифом в размере 2500 индонезийских рупий/кВт·ч. Во всех трех вариантах моделирования наблюдается снижение денежного потока на 15-м и 30-м годах, что связано с заменой нескольких элементов в системе.

Рис. 9. График чистой приведенной стоимости (NPV) за период реализации проекта наглядно демонстрирует финансовые результаты каждого варианта моделирования. Варианты 1 и 2 показывают положительные значения NPV: вариант 1 достигает 1 730 306 227,06 индонезийских рупий, а вариант 2 — 194 567 379,62 индонезийских рупий, что указывает на прибыльность обоих вариантов. В отличие от этого, вариант 3, с тарифом на электроэнергию в размере 1500 индонезийских рупий/кВтч, приводит к отрицательному значению NPV в размере -1 450 467 591,30 индонезийских рупий, что свидетельствует о финансовых потерях. Следовательно, варианты 1 и 2

считаются экономически целесообразными, тогда как вариант 3 считается нецелесообразным из-за отрицательной доходности.

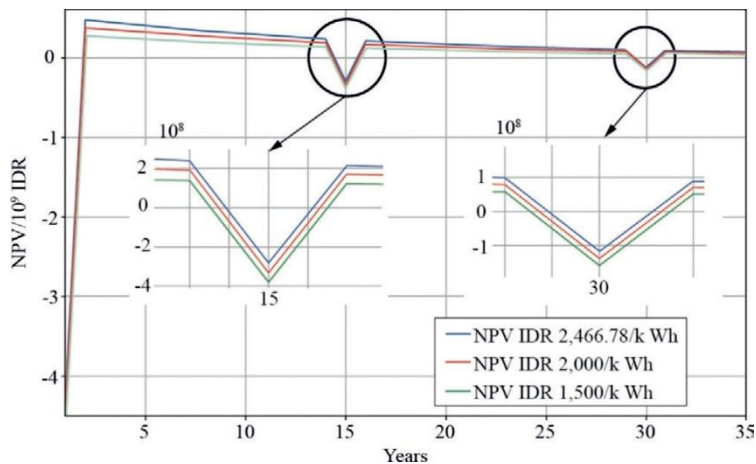


Рис. 9. График чистой приведенной стоимости (NPV).

2) Срок окупаемости (PP) связан с рентабельностью инвестиций (ROI), поэтому определить PP можно с помощью графика ROI. На рис. 10 представлено графическое изображение ROI для трех созданных вариантов моделирования, причем значения ROI для каждого из трех вариантов различаются. Значение ROI, прошедшее 0, указывает на то, что проект достиг стадии PP. В варианте 1 PP достигается через 9,22 года или около 9 лет и 2 месяцев, затем во втором варианте PP достигается через 11,62 года или около 11 лет и 7 месяцев, а в третьем варианте PP достигается на 20-м году. Однако, поскольку значение NPV в третьем варианте отрицательное, проект в этом варианте нерентабелен.

Результаты моделирования показывают, что положительная чистая приведенная стоимость (NPV) достижима только при повышенных тарифах на электроэнергию в размере 2466,8 индонезийских рупий/кВтч или 2000 индонезийских рупий/кВтч, в то время как более низкие тарифы, такие как 1500 индонезийских рупий/кВтч, приводят к отрицательной NPV, что указывает на нерентабельность проекта; эти выводы подчеркивают критическую важность разработки благоприятной тарифной политики для обеспечения экономической жизнеспособности фотоэлектрических проектов, особенно в регионах с высоким потенциалом солнечной энергии.

Анализ выявляет значительную чувствительность системы к тарифам на электроэнергию: снижение тарифов напрямую влияет на рентабельность проекта, о чем свидетельствует продление срока эксплуатации электростанций при сниженных тарифах. Этот вывод подчеркивает необходимость более благоприятной тарифной структуры в рамках энергетической политики для ускорения внедрения инфраструктуры зарядки электромобилей на основе фотоэлектрических систем.

Гибридная оптимизация PSO-GWO повышает производительность энергии при одновременном снижении затрат и выбросов, при этом Таракан демонстрирует наилучшие результаты. Этот подход превосходит предыдущие исследования и предоставляет новые возможности для выбора мест размещения солнечных зарядных станций для электромобилей в различных географических регионах.

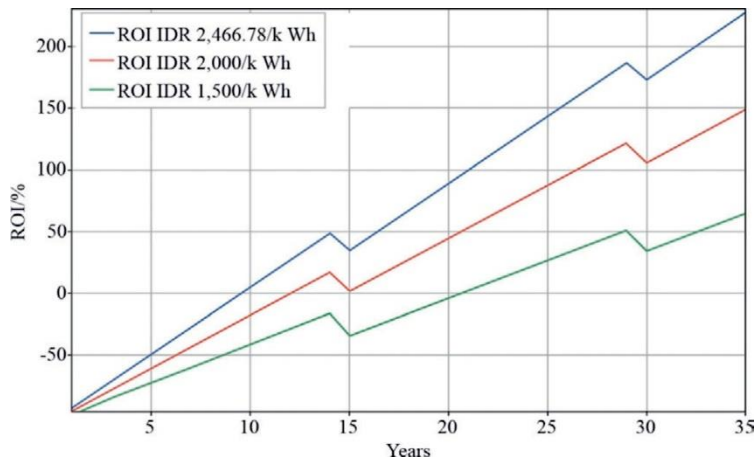


Рис. 10. График рентабельности инвестиций (ROI).

Данное исследование имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать. Географически исследование было сосредоточено на 11 городах Калимантана, включая столицу архипелага (ИKN), обладающих высоким потенциалом солнечной энергии. Результаты могут быть лишь частично применимы к другим регионам с различными географическими условиями, климатом или уровнями солнечной радиации. Данные об радиации взяты из Международного солнечного атласа и отражают среднегодовые значения, поэтому сезонные колебания следует учитывать более тщательно.

Что касается технологий, в исследовании используются монокристаллические солнечные панели с удельной эффективностью (19-25 %) и LiFePo<sub>4</sub> батареи с определенной емкостью. Производительность системы может отличаться при использовании других технологий, таких как солнечные панели с более высокой эффективностью или альтернативные типы батарей. Ввиду их эффективности для оптимизации были выбраны алгоритмы PSO и GWO. Тем не менее, они не сравнивались напрямую с другими алгоритмами, такими как генетический алгоритм (GA) или алгоритм оптимизации муравьиной колонии (ACO). На результаты оптимизации также влияют исходные параметры и ограничения моделирования. С экономической точки зрения, анализ основан на трех вариантах моделирования тарифов на электроэнергию (2466,78 индонезийских рупий/кВт·ч, 2000 индонезийских рупий/кВт·ч и 1500 индонезийских рупий/кВт·ч), которые могут не отражать будущие изменения тарифов или льгот.

Внешние факторы, такие как инфляция и рост затрат на техническое обслуживание, также не учитывались. Кроме того, предполагалось, что режимы использования нагрузки остаются постоянными для двух точек зарядки электромобилей (22 кВт на точку) без учета изменений в режимах использования в определенные периоды времени или сезоны. Другие ограничения включают данные об облучении, представляющие собой средние значения по области без учета микроклиматических изменений, и опору на исторические данные, полученные в результате моделирования без прямых полевых измерений. С экологической точки зрения, анализ сокращения выбросов вредных газов основывался исключительно на стандартном коэффициенте (0,757 кг CO<sub>2</sub>/кВт·ч) без включения анализа жизненного цикла используемой технологии. С учетом этих ограничений результаты исследования все же предоставляют важную информацию для разработки систем зарядки электромобилей на основе фотоэлектрических элементов в Калимантане. Однако требуется дополнительная проверка для применения в других областях или условиях.

#### 4 Заключение

В данном исследовании успешно проведен технический, экономический и экологический анализ систем зарядки электромобилей на основе фотоэлектрических панелей в 11 городах Калимантана.

Для определения оптимальной мощности солнечных панелей (45 кВт на точку) и аккумуляторных батарей (70 шт. по 48 В, 100 Ач) использовались алгоритмы PSO и GWO. Результаты показывают, что система способна производить от 195 268,008 кВт·ч до 215 804,88 кВт·ч энергии, при этом стоимость энергии варьируется от 916,9 до 1013,34 индонезийских рупий/кВт·ч, а выбросы вредных газов сокращаются на 435 884,29 кг CO<sub>2</sub>e. Данное исследование вносит новый вклад в науку, в частности, в оптимизацию систем возобновляемой энергии для зарядных станций электромобилей. Применение алгоритмов PSO и GWO доказало свое превосходство в достижении многоцелевой оптимизации, включая увеличение производства энергии, снижение затрат на энергию и сокращение выбросов вредных газов. По сравнению с предыдущими методами, такими как HOMER и SAM, этот подход предлагает более точное и эффективное решение, особенно для различных географических условий, таких как Калимантан. Результаты этого исследования поддерживают развитие инфраструктуры зарядки электромобилей на основе возобновляемых источников энергии в регионах с высоким потенциалом солнечной энергии, таких как Калимантан. Таракан, как место с самым высоким годовым уровнем солнечной радиации, выделяется как оптимальная область для внедрения фотоэлектрических систем, в то время как Самаринда сталкивается с более серьезными проблемами из-за более низкого уровня радиации. Данное исследование актуально для развития инфраструктуры зарядки на основе возобновляемых источников энергии в Индонезии. Кроме того, оно может служить ориентиром для других развивающихся стран, сталкивающихся с аналогичными проблемами. Таким образом, это исследование вносит вклад в научную литературу и поддерживает глобальные цели в области экологической устойчивости.

#### **О вкладе авторов в проект CRediT**

**Ариприхарта:** написание текста — рецензирование и редактирование, проверка достоверности, научное руководство, привлечение финансирования, разработка концепции. **Сатриа Адигуна:** написание текста — первоначальный вариант, визуализация, программное обеспечение, администрирование проекта. **Ариф Н. Афанди:** ресурсы, администрирование проекта, методология. **Мухаммад Кахью Багаскоро:** написание текста — рецензирование и редактирование, администрирование проекта.

#### **О конфликте интересов**

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных связей, которые могли бы повлиять на результаты работы, представленной в данной статье.

#### **Благодарности**

Исследование, представленное в данной статье, поддержано программой UM 2024, не входящей в APBN, Индонезия, контракт № 5.4.111/UN32.14.1/LT/2024.

#### **Список используемой литературы**

- [1] А.С. Ади, «Konsumsi Listrik Masyarakat Meningkatkan, Tahun 2023 Kapai 1.285» кВтч/Капита, 2024». <https://www.esdm.go.id/id/mediacenter/arsip-berita/konsumsi-listrik-masyarakat-meningkat-tahun-2023-sapai-1285-kwh-kapita>. (По состоянию на 25 января 2024 г.).
- [2] А.Ахдиат, Penjualan Mobil Listrik di Indonesia Melonjak Pada Akhir 2023, 2024. <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2024/01/16/penjualan-mobil-listrik-di-indonesia-melonjak-padaakhir-2023>. (По состоянию на 25 января 2024 г.).
- [3] А.Ахдиат, 10 Mobil Listrik Terlaris 2023, Wuling Binguo Masuk Daftar, 2024. <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2024/01/16/10-mobil-listrik-terlaris-2023-wuling-binguo-masuk-daftar>. (По состоянию на 25 января) 2024).

- [4] М.М.Сами, М.И.Мосаад, М.Ф.Эль-Наггар и др., Поддержка надежности ненадежной сети с использованием экологически чистых энергетических систем: экономическое исследование, IEEE Access 9 (2020) 14528-14539.
- [5] Н.Альшамари, М.М.Сами, Дж.Асумаду, Оптимальное экономическое исследование возобновляемых источников энергии для электрификации отдаленного региона в Королевстве Саудовская Аравия, в работе: Труды Двадцатой международной конференции по энергетическим системам Ближнего Востока (MEPCON), Каир, Египет, 2018, стр. 1040-1045.
- [6] М.М. Сами, С. Баракат, Х.С. Рамадан, Алгоритм оптимизации опыления цветов для автономной гибридной возобновляемой системы PV-топливный элемент, Int.J.Hydrogen Energy 44 (4) (2019) 2141-2152.
- [7] М.М. Махфуз, М.Р. Иравани, Интеграция в сеть станции быстрой зарядки постоянного тока с питанием от батареи для электромобилей, IEEE Trans.Energy Convers. 35 (1) (2020) 375-385.
- [8] Д. Джи, М.С. Льв, Дж.Ю. Ян и др., Оптимизация расположения и размеров станций зарядки электромобилей с использованием солнечной энергии в городской зоне, IEEE Access 8 (2020) 112772-112782.
- [9] МЭА, Мировой энергетический прогноз на 2019 год - Анализ, 2019. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>. (Дата обращения: 26 января 2024 г.).
- [10] С. Баракат, М.М. Сами, М.Б. Этейба и др., Исследование осуществимости интегрированной энергетической системы на основе фотоэлектрических панелей и биомассы, подключенной к сети, в Египте, Int.J.Emerg.Electr.Power Syst. 17 (5) (2016) 519-528.
- [11] Т.С.Бия, М.Р.Синдху, Проектирование и управление питанием солнечной зарядной станции для электромобилей с системой хранения энергии. Труды 3-й Международной конференции по электронике, связи и аэрокосмическим технологиям (ICESA), Коимбатур, Индия, 2019, стр. 815-820.
- [12] Х.В.Ибрагим, А.П.Прасетьоно, М.Т. Мусри и др., Перспективы развития энергетики Индонезии на 2023 год, Генеральный секретариат национальной энергетики, Индонезия, 2023.
- [13] Д.Абвелджалиль, Б.Негру, Т.Юссеф и др., Внедрение оптимального размера и нового подхода к управлению энергией в конструкцию гибридного электромобиля на топливных элементах, Energy Environ.36 (2) (2025) 616-637.
- [14] Азиатский банк развития, Оценка энергетического сектора Индонезии, обновление стратегии и дорожной карты. Азиатский банк развития, Филиппины, 2021.
- [15] Ф. Уэслати, Оптимизация HOMER автономных водородных заправочных станций, работающих на фотоэлектрических/ветровых/аккумуляторных батареях, расположенных в двадцати выбранных городах Франции, Int.J.Renew.Energy Dev.12 (6) (2023)1070-1090.
- [16] С. Баракат, М.М. Сами, М.Б. Этейба и др., Исследование целесообразности гибридной энергетической системы, подключенной к сети, на основе фотоэлектрических панелей, ветровых турбин и биомассы, для небольшой деревни в Египте, в работе: Материалы Восемнадцатой международной конференции по энергетическим системам Ближнего Востока (MEPCON), Каир, Египет, 2016, стр. 46-51.
- [17] М.М. Сами, А. Эмам, Э. Таг-Эльдин и др., Изучение методов хранения энергии для подключенных к сети экологически чистых электростанций в случае повторяющихся отключений, J.Storage Mater.54 (2022) 105307.

- [18] Дж. Лангер, Дж. Квист, К. Блок, Обзор потенциала возобновляемой энергии в Индонезии и его вклад в 100% возобновляемую электроэнергетическую систему, *Energies* 14 (21) (2021) 7033.
- [19] А.Ф. Гювен, Н. Йорукерен, М.М. Сами, Оптимизация проектирования автономной системы экологически чистой энергии университетского кампуса на основе алгоритмов поиска Jaya-Harmony и оптимизации муравьиной колонии, *Energy* 253 (2022) 124089.
- [20] М.М. Сами, Р.Е. Алмамлук, Х.И. Эльхули и др., Принятие решений и оптимальное проектирование систем зеленой энергетики на основе статистических методов и подходов с использованием искусственных нейронных сетей, *Общество устойчивого развития городов*, 84 (2022) 104015.
- [21] А. Фатих Гювен, М. Махмуд Сами, Анализ производительности автономной системы зеленой энергетики на основе много- и гибридных метаэвристических методов оптимизации, *Energ.Conver.Manage.*269 (2022) 116058.
- [22] А. Х. Яфи, А. Багаскара, А. П. Сисдвинуграха и др., Перспективы энергетического перехода в Индонезии, *Институт реформы основных услуг*, 2024.
- [23] С. Баракат, А. Эмам, М. М. Сами, Исследование решений по хранению энергии в подключенных к сети системах зеленой энергетики в случае частых отключений электроэнергии, *Energy Rep.*8 (2022) 5177-5191.
- [24] Т.Х. Шах, А. Шаббир, А. Вакас и др., Техничко-экономическая оценка зарядных станций для электромобилей, интегрированных с фотоэлектрическими системами на существующих автозаправочных станциях: мультигородская исследовательская модель, *Renew.Energy* 209 (2023) 133-144.
- [25] Ч. Ли, Ю.Ч. Шань, Л. Чжан и др., Техничко-экономическая оценка зарядных станций для электромобилей на основе гибридной возобновляемой энергии в Китае, *Energy Strat.Rev.*41 (2022) 100850.
- [26] С. Правеенкумар, Э. Б. Агьекум, Дж. Д. Ампа и др., Техничко-экономическая оптимизация фотоэлектрической системы для производства водорода и зарядных станций для электромобилей в пяти различных климатических условиях Индии, *Int.J.Hydrogen Energy* 47 (90) (2022)38087-38105.
- [27] М. М. Сами, С. Баракат, Гибридная оптимизация инвазивных сорняков - алгоритм оптимизации роя частиц для микросети электроснабжения на основе биомассы/фотоэлектрических элементов, в: *Материалы 21-й Международной конференции по энергетическим системам Ближнего Востока (MEPCON)*, Каир, Египет, 2019, стр. 377-382.
- [28] С. Мохтара, Б. Негру, Н. Сетту и др., Оптимизация проектирования автономных гибридных систем возобновляемой энергии с учетом влияния энергоэффективности зданий и изменения климата: тематическое исследование Алжира, *Energy* 219 (2021) 119605.
- [29] З. Улла, С.Р. Ван, Г. Ву и др., Оптимальное планирование и технико-экономический анализ электромобилей путем внедрения солнечной зарядной станции, подключенной к сети, *Energy* 267 (2023) 126560.
- [30] Н. Мухаммад, *Ada 1.380 SPKLU di Indonesia pada April 2024, Terbanyak di Jawa*, 2024. <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2024/05/31/ada-1380-spklu-di-indonesia-pada-april-2024-terbanyak-di-jawa>. (По состоянию на 29 июля 2024 г.).
- [31] «Директорат Джендерал ЕВТКЕ - Кементерианский ЕSDM, 2018». <https://ebtke.esdm.go.id/post/2019/03/04/2152/panduan.studi.kelayakan.pembangkit.listrik.tenaga.surya.plts.terpusat>. (По состоянию на 1 февраля 2024 г.)

- [32] М.М. Хасан, Б. Агили, И. Заман и др., Производство пресной воды для интеграции в микросети: физика, прогресс и перспективы солнечно-теплового испарения, *Cleaner Energy Syst.* 3 (2022) 100037.
- [33] Л. Гумилар, А.Н. Афанди, А. Ариприхарта и др., Взаимосвязь зарядной станции для батарей и возобновляемой энергии в электроэнергетической системе, в работе: Материалы Международного семинара по применению информационных и коммуникационных технологий (iSemantic), Семаранг, Индонезия, 2020, стр. 232-237.
- [34] К. Айтола, Г. Гава Сонаи, М. Маркканен и др., Инкапсуляция коммерческих и перспективных солнечных элементов с акцентом на перовскитные солнечные элементы, *Sol.Energy* 237 (2022) 264-283.
- [35] Р. Б. Бергманн, К. Берге, Т. Дж. Ринке и др., Достижения в области монокристаллических кремниевых тонкопленочных солнечных элементов методом послойного переноса, *Sol.Energy Mater.Sol.Cells* 74 (1-4) (2002) 213-218.
- [36] К.Х. Вибово, И. Фадлика, Ариприхарта и др., Новый MPPT на основе миграции пчелиной матки (QNBV) в автономной фотоэлектрической системе, в работе: Труды Международной конференции IEEE по автоматическому управлению и интеллектуальным системам (I2CACIS) 2019 года. Селангор, Малайзия, 2019, стр. 123-128.
- [37] М.М. Камал, И. Ашраф, Планирование и оптимизация гибридной микросети для надежной электрификации сельских районов, *Журнал инженеров (Индия): Серия В* 103 (1) (2022) 173-188.
- [38] А.Х. Азад, В. Вахидинасаб, Х. Шатери, Оптимальное планирование автономной гибридной энергетической фермы, включающей ветровую, фотоэлектрическую, дизельную генераторную и накопительную установки. Труды 10-й конференции по интеллектуальным сетям (SGC) 2020 года. Кашан, Иран, 2020, стр. 1-6.
- [39] Л. Эль Будждайни, А. Мезрхаб, М.А. Муссауи и др., Расчет размеров автономной гибридной энергетической системы PV-ветровая-аккумуляторная-дизельная и оптимальная комбинация с использованием алгоритма оптимизации роя частиц, *Electr.Eng.*104 (5) (2022) 3339-3359.
- [40] Х.Лезкано, Дж.Родас, Дж.Пачер и др., Проектирование и проверка модульной платформы управления для инвертора напряжения, *HardwareX* 13 (2022) e00390.
- [41] И. Чайрез, В. Уткин, Управление положением двигателя постоянного тока с помощью двухфазного трехфазного преобразователя переменного/постоянного тока с управлением скользящим режимом, *IFAC-PapersOnLine* 55 (9) (2022) 333-338.
- [42] Ф. Ронилайя, Р.И. Путри, М. Хидаят, Метод управления на основе фаз для управления потоком мощности солнечных фотоэлектрических систем, подключенных к сети, с помощью однофазного микроинвертора, 2020. <https://www.academia.edu/download/98998498/pdf.pdf>. (Дата обращения: 3 июня 2024 г.).
- [43] М.А. Ханнан, С.Б. Вали, П.Дж. Кер и др., Системы хранения энергии на основе батарей: обзор технологий, целей оптимизации, ограничений, подходов и нерешенных вопросов, *J.Storage Mater.*42 (2021) 103023.
- [44] Ю.К. Ян, С. Бремнер, К. Мениктас и др., Определение размера системы хранения энергии на основе батарей в системах возобновляемой энергии: обзор, *Renew.Sustain.Energy Rev.*91 (2018) 109-125.
- [45] Дж. Кардосо, В. Сильва, Д. Эусебио, Технично-экономический анализ электростанции газификации биомассы, использующей смеси лесных отходов для производства электроэнергии в Португалии, *J.Clean.Prod.*212 (2019) 741-753.

- [46] Л. Аль Гуссейн, Экономическая оценка инвестиций в фотоэлектрические системы в Иордании, *Innov.Energy Res.* 6 (2) (2017) 159-162.
- [47] М. Альмактар, Х. Абдул Рахман, М. Й. Хассан, Экономический анализ с использованием чистой приведенной стоимости и периода окупаемости: тематическое исследование фотоэлектрической системы мощностью 9 кВт, подключенной к сети, в кампусе UTM, Джохор-Бахру, *Appl.Mech.Mater.* 818 (2016) 119-123.
- [48] Н. Поли, К. Бональдо, М. Моретто и др., Техничко-экономическая оценка будущих ванадиевых проточных батарей на основе реальных параметров устройства/рынка, *Appl.Energy* 362 (2024) 122954.
- [49] А. Д. Пранади, К. Харамани, А. Сетиаван и др., Анализ чувствительности финансовых параметров при изменении проникновения фотоэлектрических систем в оптимальном месте расположения фидера, *Energy Procedia* 156 (2019) 95-99.
- [50] С. Барал, Дж. Себо, Техничко-экономическая оценка производства зеленого водорода, интегрированного с гибридными и органическими системами цикла Ранкина (ORC), *Heliyon* 10 (4) (2024) e25742.
- [51] Д.Джанг, Дж.Ким, Д.Ким и др., Техничко-экономический анализ и моделирование методом Монте-Карло технологии производства зеленого водорода с использованием различных технологий электролиза воды, *Energy Conver.Manage.*258 (2022) 115499.
- [52] В.Шень, К.Чень, Дж.Циу и др., Комплексный обзор приведенной стоимости электроэнергии для возобновляемых источников энергии, *Renew.Sustain.Energy Rev.*133 (2020) 110301.
- [53] Б.А.Нието-Диаз, А.Ф.Кроссланд, К.Гровз, Подход к выбору и оптимизации новых фотоэлектрических технологий с учетом приведенной стоимости энергии: относительное влияние деградации, стоимости и начальной эффективности, *Appl.Energy* 299 (2021) 117302.
- [54] М.Р.Акбар, Ариприхарт, А. Мизар и др., Техничко-экономический анализ гибридной фотоэлектрической системы для школьного производства. Труды 3-й Международной конференции IEEE по применению в энергетике (ICPEA) 2023 года. Путраджая, Малайзия, 2023, стр. 191-196.
- [55] К. Факих, В. Примади, А.Н. Хандаяни и др., Пилотная версия интеллектуальной фотоэлектрической системы с использованием интенсивности солнечного света и состояния заряда (SoC) батареи на основе управления с помощью нечеткой логики Мамдани, *J.Mech.Electric.Power Veh.Technol.*10 (1) (2019) 36-47.
- [56] Ю.В.Ли, К.К.Янг, Е.С.Ду и др., Обзор подходов к учету выбросов углерода в электроэнергетической отрасли, *Appl.Energy* 359 (2024) 122681.
- [57] А.Гудчайлд, Е.Выгоник, Н.Майес, Аналитическая модель для расчета пробега транспортных средств и выбросов углерода в вариантах моделирования доставки товаров, *Eur.Transp.Res.Rev.*10 (1) (2017) 8.
- [58] «Генеральный директор ЕВТКЕ - Министерство энергетики и промышленной безопасности, 2016». <https://ebtke.esdm.go.id/post/2016/01/22/1086/proyek.emisi>. (Дата обращения: 18 марта 2024 г.).
- [59] С. Баракат, А. И. Осман, Э. Таг-Эльдин и др., Достижение экологичной мобильности: многоцелевая оптимизация для устойчивой зарядки электромобилей, *Energy Strat.Rev.*53 (2024) 101351.

- [60] М. М. Сами, Х. И. Эльхули, С. Баракат, Многоцелевая оптимизация гибридной системы возобновляемой энергии на основе биомассы и топливных элементов, *Int.J.Energy Res.*45 (6) (2021) 8214-8230.
- [61] С.С.Лаи, Ю.В.Джиа, М.Д.МакКаллох и др., Кластерный анализ ежедневных профилей индекса прозрачности для фотоэлектрической системы, *IEEE Trans.Ind.Inf.*13 (5) (2017) 2322-2332.
- [62] П.Игор, П.Далибор, М.Невен, Сравнение измеренного индекса прозрачности для разных мест в регионе с умеренным континентальным климатом, *Przeglad Elektrotechniczny* 90 (3) (2014) 128-131.
- [63] О.О.Апех, О.К.Оверен, Е.Л.Мейер, Ежемесячные, сезонные и годовые оценки глобальной солнечной радиации, индекса прозрачности и рассеянной радиации в Элисе, Южная Африка, *Sustainability* 13(4)(2021)2135.
- [64] Х.В.Цу, Б.Гао, К.Л.Конг и др., Экспериментальное исследование влияния температуры окружающей среды на выходные характеристики систем PVPCM, *J.Storage Mater.*88 (2024) 111535.
- [65] П.Бивол, П.Эклаш, Ф.Кузник, Повышение производительности солнечных панелей за счет использования материалов с фазовым переходом. Труды Линкопингской электронной конференции, Электронное издательство Линкопингского университета, 2011, стр. 2953-2960.
- [66] Н.Монгасеми, А.Валиее, К.Куприанидис и др., Оценка на основе рангов развертывания подключенных к сети солнечных панелей на крышах с учетом сценариев отложенной установки, *Energies* 16(21)(2023) 7335.

Получено 31 июля 2024 г.; отредактировано 9 декабря 2024 г.; принято 20 января 2025 г.

Экспертная оценка проводится под руководством компании Global Energy Interconnection Group Co.Ltd.

**\* Ответственный автор**

Адреса электронных почт: aripriharta.ft@um.ac.id (Ариприхарта), satriaadiguna.work@gmail.com (С. Адигуна), an.afandi@um.ac.id (А.Н. Афанди), Muhammad.cahyo.2305348@students.um.ac.id (М.К. Багаскоро).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 2, 2025 г. Оригинальное название статьи:< Techno-economic modeling and analysis of a PV EV charged with battery energy storage system (BESS) on Kalimantan Island>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2025.01.003>

2096-5117/© 2025 Global Energy Interconnection Group Co.Ltd. Издательские услуги предоставлены Elsevier B.V. от имени KeAi Communications Co.Ltd. Данная статья находится в открытом доступе и распространяется по лицензии CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



**Ариприхарта** получил степень магистра технических наук в области электротехники в Университете Бравайя, Индонезия, в 2004 и 2012 годах соответственно, а также защитил докторскую диссертацию по электронной инженерии в Национальном университете науки и технологий Гаосюн, Китай, Тайвань, в 2017 году. С 2005 года он является преподавателем и руководителем исследований на инженерном факультете Государственного университета Маланга, Индонезия, специализируясь в лаборатории силовой электроники, Интернета вещей и алгоритмов. В 2019 году он присоединился к Центру усовершенствованных материалов для возобновляемой энергии (CAMRY) Индонезии в качестве генерального секретаря. Он является лауреатом многочисленных наград Индонезии.



**Сатриа Адигуна** - студент старшего курса факультета электротехники и информатики Государственного университета Маланга и научный сотрудник лаборатории управления энергетическими системами. Его научные интересы включают в себя возобновляемую энергетику и электромобили, а также активное стремление к развитию устойчивых энергетических решений и внедрению инновационных технологий в области энергетики.



**Ариф Н. Афанди**, родом из Маланга, Индонезия, получил степень доктора философии в Университете Кумамото, Япония. Он также имеет степень магистра технических наук от Университета Гаджа Мада и степень инженера от Университета Бравиджая, оба образовательных учреждения расположены в Индонезии. С 1999 года он работает в Государственном университете Маланга, где участвует в работе Центра энергетических систем (PESC), является автором инженерных работ и проводит исследования на кафедре электротехники. Его научные интересы включают энергетические системы, промышленную автоматизацию, системы управления, интеллектуальные вычисления и инженерную оптимизацию. Он является членом нескольких международных профессиональных организаций, включая IEEE, Международную ассоциацию

инженеров, Международную ассоциацию инженеров и ученых, Всемирную ассоциацию науки и техники и др.



**Мухаммад Кахьо Багаскоро** обладает развитыми коммуникативными навыками, умением работать в команде, тайм-менеджментом и графическим дизайном. Он имеет опыт работы ассистентом преподавателя на семинаре по робототехнике и владеет программированием на языке Python. Он получил степень бакалавра электротехники в государственном университете Маланга. Его специализация включает анализ баланса SOC с использованием регулирования по принципу «просадки» в системах хранения энергии и силовой электронике.

(Редактор: Цзэдун Чжан)