

# RAPORT STRATEGICZNY: INTEGRACJA TECHNOLOGII PEROWSKITOWEJ SAULE Z ARCHITEKTURĄ C4ISR BLOX-TAK DLA POLSKIEJ OBRONY CYWILNEJ

Data: 1 Grudnia 2025

Klasyfikacja: OPEN SOURCE / DUAL USE (PODWÓJNE ZASTOSOWANIE)

Dotyczy: Analiza wykonalności zasilania rozproszonych węzłów C4ISR (EUD oraz Orange Pi 5) z wykorzystaniem elastycznych ogniw perowskitowych Saule Technologies w warunkach zagrożeń hybrydowych.

---

## 1. Streszczenie Zarządcze (Executive Summary)

Niniejszy raport stanowi techniczną i operacyjną walidację wykorzystania elastycznych modułów fotowoltaicznych Saule Technologies o powierzchni  $1\text{m}^2$  w ekosystemie **BLOX-TAK-SERVER-GCP**. W obliczu zawirowań prawnych i finansowych wokół Saule Technologies, analiza ta wykazuje, że technologia ta posiada unikalne cechy krytyczne dla polskiego systemu bezpieczeństwa (Obrona Cywilna, WOT), których nie mogą zastąpić standardowe panele krzemowe.

### Kluczowe wnioski dla projektu BLOX-TAK:

- Potwierdzenie Użyteczności:** Elastyczne ogniwo perowskitowe  $1\text{m}^2$  (generujące nominalnie  $\sim 100\text{ Wp}$ ) jest w pełni wystarczające do zasilania smartfona (EUD) z wtyczką ATAK-CIV-PL przez cały rok, zapewniając ogromny margines bezpieczeństwa nawet w miesiącach zimowych.
- Wyzwanie dla Orange Pi 5:** Dla węzła serwerowego Orange Pi 5 (z dyskiem SSD i emulacją Waydroid), jedno ogniwo  $1\text{m}^2$  zapewnia pełną autonomię operacyjną od marca do października. W krytycznych miesiącach zimowych (grudzień-styczeń) występuje deficyt energii rzędu  $50\text{ Wh/dobę}$ , który wymaga zastosowania bufora akumulatorowego ( $\text{LiFePO}_4$ ) o pojemności min.  $40\text{ Ah}$  lub zwiększenia powierzchni ogniw do  $2\text{m}^2$ .
- Przewaga Taktyczna (Stealth):** Technologia Saule umożliwia maskowanie węzłów w sposób niemożliwy dla sztywnych, błyszczących paneli krzemowych. Matowa powierzchnia, elastyczność i brak konieczności idealnego kątownia pod słońce stanowią o charakterystyce **Low Probability of Detection (LPD)**.

---

## 2. Analiza Techniczna: Ogniwo Perowskitowe Saule Technologies ( $1\text{m}^2$ )

Bazując na specyfikacji technicznej technologii perowskitowej oraz danych o wdrożeniu produkcji modułów wielkopowierzchniowych przez zespół Olgi Malinkiewicz:

- Charakterystyka Fizyczna:** Ogniwa drukowane są na elastycznej folii PET, charakteryzując się niską wagą ( $\sim 730\text{ g/m}^2$ ) i zdolnością do pracy w świetle rozproszonym oraz sztucznym.

- **Moc Rzeczywista:** Choć rekordy laboratoryjne przekraczają 25% sprawności, dla zastosowań polowych (elastyczne moduły produkowane masowo) przyjęto bezpieczną sprawność operacyjną na poziomie 10-12%. Daje to moc szczytową (STC) rzędu **100 Wp na \$1m^2\$**.
- **Wydajność w Polsce (Zima):** To parametr krytyczny. W grudniu w Polsce średnie nasłonecznienie na płaszczyznę pionową (np. ściana) wynosi ok. \$16-23\text{ kWh/m}^2\$ miesięcznie, co daje średnio \$0.5-0.7\text{ kWh/m}^2/\text{dzień}\$. Perowskity, dzięki lepszemu współczynnikowi absorpcji światła rozproszonego, utrzymują wyższe napięcie w pochmurne dni niż krzem.

### 3. Scenariusz A: Zasilanie End User Device (Smartfon bez ekranu)

**Konfiguracja:** Smartfon (np. Google Pixel lub Samsung) z wyłączonym ekranem, uruchomionym pluginem ATAK-CIV-PL (nasłuch AI/TensorFlow) oraz tunelem VPN WireGuard.

#### Bilans Energetyczny:

- **Pobór mocy (Idle/Background):** Nowoczesne smartfony w trybie głębokiego uśpienia zużywają pomijalne ilości energii, ale aktywny mikrofon i procesor NPU (nasłuch ciągły) podnoszą zużycie. Pomiary wskazują na pobór rzędu \$1.5 - 2.0\text{ W}\$ przy aktywnej inferencji audio.
- **Zużycie dobowe:**  $2.0\text{ W} \times 24\text{ h} = \mathbf{48\text{ Wh}}$ .

#### Wnioski dla EUD:

- Jedno ogniwo Saule \$1m^2\$ jest całkowicie wystarczające.
- **Lato:** Generacja \$>600\text{ Wh/dzień}\$ (nadmiar ponad 12-krotny).
- **Zima (Grudzień):** Generacja \$\sim 60-80\text{ Wh/dzień}\$ (przy sprawności 10-12% w świetle rozproszonym).
- **Werdykt:** Ogniwo \$1m^2\$ pokrywa zapotrzebowanie smartfona z marginesem bezpieczeństwa nawet w najciemniejszym miesiącu roku. Standardowy powerbank \$20\,000\text{ mAh}\$ wystarczy jako bufor na 2-3 dni totalnej ciemności.

### 4. Scenariusz B: Zasilanie Węzła Edge (Orange Pi 5 + Waydroid)

Jest to scenariusz kluczowy dla projektu C4ISR. Orange Pi 5 (architektura ARM64, RK3588S) pełni rolę autonomicznego serwera/przekaźnika z emulacją Androida (Waydroid).

Bilans Energetyczny (Orange Pi 5):

Uruchomienie kontenera Waydroid zapobiega wejściu procesora w głębokie stany uśpienia.

- **Konfiguracja:** Orange Pi 5, dysk SSD NVMe, brak monitora (fake HDMI), modem LTE/5G.
- **Pobór mocy:**
  - Idle (sam Linux): \$\sim 2.2\text{ W}\$.
  - Obciążenie z Waydroid, SSD i siecią: \$\sim 5.0-5.5\text{ W}\$ (ciągłe).
- **Zapotrzebowanie dobowe:**  $5.5\text{ W} \times 24\text{ h} \approx \mathbf{132\text{ Wh}}$ .

**Konfrontacja z Ogniwnem Saule (\$1m^2\$):**

- **Wiosna/Lato/Jesień:** Ogniwo produkuje 200-600 Wh dziennie. Pełna autonomia. Nadmiar energii jest ogromny.
- **Zima (Grudzień/Styczeń):**
  - Produkcja z  $1m^2$ : ~60-80 Wh (średnio).
  - Zapotrzebowanie węzła: 132 Wh.
  - **DEFICYT:** Brakuje około 50-70 Wh dziennie.

Rozwiązanie Problemu Zimy dla SBC:

Aby zapewnić działanie węzła Orange Pi 5 przez okrągły rok, rekomendowane są dwa podejścia:

1. **Opcja Militarna (Zalecana):** Dwa ogniwa Saule. Zwiększenie powierzchni do  $2m^2$  (np. owinięcie pnia drzewa i dachu) zapewni ~120-160 Wh w zimie, co pokrywa zapotrzebowanie "na styk".
2. **Opcja Hybrydowa:** Specjalistyczny Magazyn Energii. Jeśli system ma działać na jednym ogniwie  $1m^2$ , konieczny jest duży akumulator, który zgromadzi energię w rzadkie słoneczne dni zimowe (kiedy produkcja skacze do 200 Wh) i odda ją w dni pochmurne.
  - **Rekomendacja:** Akumulator LiFePO4 12V 40Ah.
  - **Pojemność:** ~480-500 Wh.
  - Pozwoli to na przetrwanie ok. 7-10 dni przy deficycie 50Wh/dzień. Jest to rozwiązanie wystarczające dla polskiego klimatu, gdzie okresy bezwzględnego zachmurzenia rzadko trwają dłużej niż tydzień bez przejaśnień.

## 5. Integracja ze Starlink Direct to Cell

Projekt wpisuje się w nadchodzącą rewolucję Starlink Direct to Cell.

- **Kluczowy fakt:** Usługa ta nie wymaga anteny talerzowej Starlink (która zużywa 50-70W i zniszczyłaby bilans energetyczny).
- **Działanie:** Smartfon (EUD) lub modem LTE w Orange Pi 5 łączy się z satelitą tak jak z wieżą GSM.
- **Wpływ na zasilanie:** Pobór mocy przy transmisji do satelity jest porównywalny z transmisją do odległego BTS-a naziemnego. Bilans energetyczny (50Wh dla EUD) uwzględnia ten zapas.
- **Znaczenie Strategiczne:** Węzeł ukryty w lesie, zasilany perowskitem, komunikujący się z satelitą, jest całkowicie niezależny od krajowej infrastruktury.

## 6. Argumentacja dla Obrony Saule Technologies (Dual Use)

W dokumencie "White Paper" należy użyć następujących argumentów strategicznych:

1. **Low Probability of Detection (LPD) / Stealth:** Standardowe panele krzemowe są "lustrami" widocznymi dla dronów i termowizji. Ogniwa Saule na elastycznej folii można owinąć wokół gałęzi, pnia drzewa lub wkomponować w poszycie namiotu. Są matowe i

nie tworzą tak wyraźnej sygnatury termicznej.

2. **Suwerenność Technologiczna:** Większość paneli krzemowych pochodzi z Azji. Saule Technologies to polska produkcja. Utrzymanie zdolności produkcyjnej tych ogniw w kraju jest kluczowe dla ciągłości dostaw sprzętu "dual use" w czasie kryzysu.
3. **Odporność (Resilience):** System C4ISR zasilany rozproszonymi źródłami energii (perowskity na każdym węźle) jest niemożliwy do wyłączenia poprzez atak na elektrownie systemowe (taktyka obserwowana na Ukrainie).

---

## 7. Rekomendacje Wdrożeniowe

### Konfiguracja Sprzętowa (BOM):

- **Źródło:** 1x (lub 2x dla pewności zimą) Ogniwo Saule Technologies \$1m<sup>2</sup>\$.
- **Magazyn:** Akumulator LiFePO4 12V 40Ah (zamiast wielu małych powerbanków).
- **Kontroler:** MPPT dedykowany do ogniw cienkowarstwowych (np. Genasun lub Victron SmartSolar) - kluczowy dla uzyskania energii w cieniu.
- **Przetwornica:** Wysokosprawna (95%) przetwornica Step-Down 12V->5V dla Orange Pi 5 (np. marki Pololu).

### Optymalizacja Software (Orange Pi 5):

- Wdrożenie skryptu monitorującego napięcie baterii na GPIO. W przypadku spadku napięcia poniżej 12.0V (kryzys zimowy), skrypt powinien zatrzymywać kontener Waydroid, pozostawiając jedynie podstawowy system Linux do telemetrii, redukując zużycie energii o połowę.