

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 $1m^2$ 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 $1m^2$ (generujące nominalnie ~100 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 $1m^2$ zapewnia pełną autonomię operacyjną od marca do października. W krytycznych miesiącach zimowych (grudzień-styczeń) występuje deficyt energii rzędu 50 Wh/dobę, który wymaga zastosowania bufora akumulatorowego (LiFePO4) o pojemności min. 40Ah lub zwiększenia powierzchni ogniw do $2m^2$.
- Przewaga Taktyczna (Stealth):** Technologia Saule umożliwia maskowanie węzłów w sposób niemożliwy dla sztywnych, błyszczących paneli krzemowych. Matowa powierzchnia, elastyczność i brak konieczności idealnego kątowania pod słońce stanowią o charakterystyce **Low Probability of Detection (LPD)**.

2. Analiza Techniczna: Ogniwo Perowskitowe Saule Technologies ($1m^2$)

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, charakteryzują 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. $\$16\text{-}23\text{~kWh/m}^2\$$ miesięcznie, co daje średnio 0.5-0.7 kWh/m²/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 wyłączenym 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 W przy aktywnej inferencji audio.
- **Zużycie dobowe:** $2.0\text{~W} \times 24\text{h} = \mathbf{48\text{~Wh}}$.

Wnioski dla EUD:

- Jedno ognisko Saule $\$1m^2\$$ jest całkowicie wystarczające.
- **Lato:** Generacja $>600\text{ Wh/dzień}$ (nadmiar ponad 12-krotny).
- **Zima (Grudzień):** Generacja $\sim60\text{-}80\text{ Wh/dzień}$ (przy sprawności 10-12% w świetle rozproszonym).
- **Weryfikat:** Ognisko $\$1m^2\$$ pokrywa zapotrzebowanie smartfona z marginesem bezpieczeństwa nawet w najciemniejszym miesiącu roku. Standardowy powerbank 20 000 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): $\sim2.2\text{ W}$.
 - Obciążenie z Waydroid, SSD i siecią: $\sim5.0\text{-}5.5\text{ W}$ (ciągłe).
- **Zapotrzebowanie dobowe:** $5.5\text{~W} \times 24\text{h} \approx \mathbf{132\text{~Wh}}$.

Konfrontacja z Ogniskiem 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.

Rozwiązywanie 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 talarzowej 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 owinać 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^2\$.
- **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.