

## **Analiza i modelowanie wymiany ciepła w obiektach przemysłowych ogrzewanych promiennikami podczerwieni**

Adrian Orłowski\*

**Słowa kluczowe:** promienniki podczerwieni, promieniowanie, hala przemysłowa, ogrzewanie

### **Streszczenie**

Przedmiotem pracy jest analiza i identyfikacja wymiany ciepła przez promieniowanie w hali przemysłowej, opracowanie programu obliczeniowego oraz implementacja opracowanego kodu w języku VisualBasic (VBA/MS Excel). Praca opisuje dwuwymiarowy model hali, uwzględniający strefy zacienienia. Daje możliwość ustawienia w hali prostokątnego przedmiotu, a więc najczęściej jest to używana w takich miejscach paleta Euro, na której znajdują się przechowywane w hali przedmioty. Taki układ może być zamodelowany z jednym lub dwoma promiennikami. Poddano analizie położenie palety względem promiennika w celu jak najlepszego ogrzania hali przemysłowej oraz wykorzystania dostępnej mocy. Omówiono także wyniki obliczeń zamodelowanego układu w stanie ustalonym z różnymi wariantami, tzn. układ z zadaną temperaturą wewnętrzną na stałym poziomie, układ z wymianą ciepła w hali wyłącznie na drodze promieniowania czy też z temperaturą wewnętrzną w hali wyznaczaną na podstawie konwekcji z elementów budynku. Uzyskane wyniki omówiono pod kątem wykorzystania algorytmu do wstępnego oszacowania opromieniowania i odczuwalnej temperatury w hali przemysłowej.

---

\* Rozdział przygotowano podczas pracy nad projektem dyplomowym magisterskim wykonywanym przez autora w Instytucie Techniki Ciepłej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, pod opieką Dra inż. Ziemowita Ostrowskiego.

## Spis oznaczeń

- $a$  – absorpcyjność, -  
 $A$  – powierzchnia,  $m^2$   
 $\dot{B}$  – opromieniowanie ( $\dot{B}_i$  – opromieniowanie powierzchni  $i$ ), W  
 $\dot{E}_i$  – emisja własna powierzchni  $i$ , W  
 $F_{i-j}$  – stosunek konfiguracji pomiędzy powierzchniami  $i-j$ , -  
 $\dot{H}$  – jasność promieniowania (całej powierzchni), W  
 $L_{1,2,3,4}$  – długość odcinka 1,2,3,4, m  
 $\dot{q}$  – gęstość strumienia ciepła,  $W/m^2$   
 $r$  – refleksyjność, -  
 $T$  – temperatura, K  
 $t$  – transmisyjność, -  
 $W_j$  – szerokość  $j$ -tej płytki, m  
 $x, y$  - współrzędne geometryczne miejsca, m  
 $\alpha$  – współczynnik wnikania ciepła (przejmowania ciepła),  $W/(m^2 \cdot K)$   
 $\delta$  – grubość, m  
 $\varepsilon$  – emisyjność, -  
 $\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła,  $W/(m \cdot K)$   
 $\sigma$  – stała Stefana-Boltzmana,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ ,  $W/(m^2 \cdot K^4)$

## Indeksy

- $g$  – gruntu (warstwy ziemi)  
 $i$  – odnoszący się do  $i$ -tej powierzchni  
 $j$  – odnoszący się do  $j$ -tej powierzchni  
 $odcz-i$  – odczuwalna  $i$ -tej powierzchni  
 $R_i$  – promieniowania  $i$ -tej powierzchni  
 $\acute{s}r$  – średnioroczna powietrza zewnętrznego  
 $w$  – wewnętrzny  
 $z$  – zewnętrzny

# 1 Wprowadzenie

## 1.1 Problematyka projektowania instalacji promiennikowych

Ogrzewanie obiektów budowlanych o dużych wymiarach, takich jak hale przemysłowe, wymaga zwrócenia szczególnej uwagi na koszty energii zużytej do tego celu oraz zapewnieniu komfortu i bezpieczeństwa w miejscu przebywania osób. Istnieje wiele systemów rozwiązań ogrzewania obiektów przemysłowych, jednak z powodu cech promieniowania, takich jak przenikanie przez powietrze prawie bez strat, możliwość ukierunkowania energii na wybraną powierzchnię czy krótki czas nagrzewania, zużycie energii przy ogrzewaniu przez promieniowanie jest niższe niż w konwencjonalnych systemach grzewczych [4].

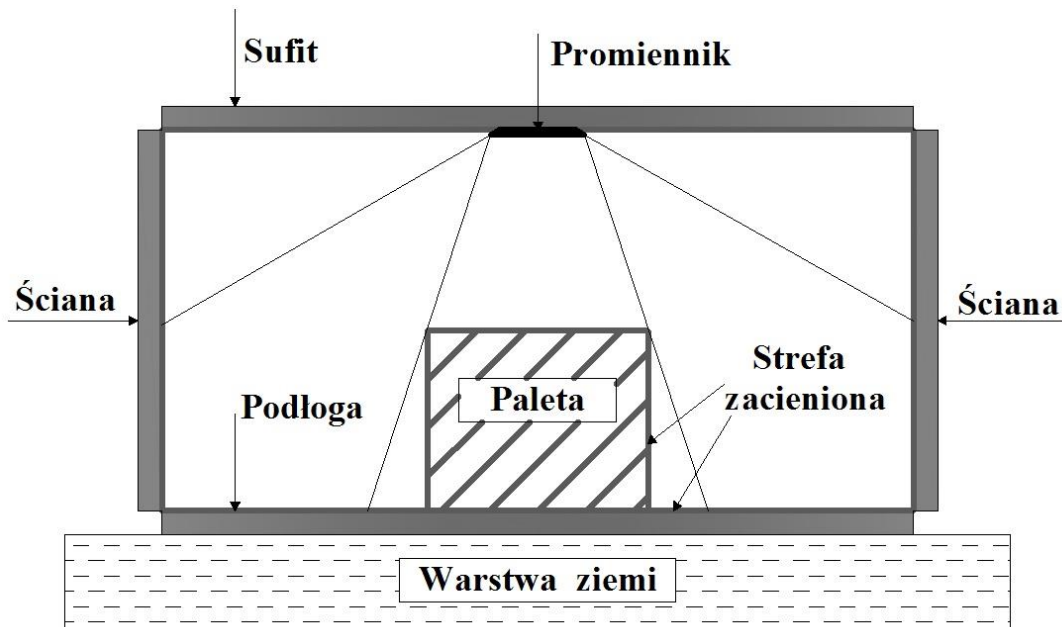
Przy projektowaniu instalacji ogrzewania promiennikami trzeba wziąć pod uwagę wiele czynników. Należy określić warunki brzegowe, takie jak wymiary budynku, właściwości materiałów czy parametry otoczenia odpowiednie dla lokalizacji obiektu [3]. Ważnym elementem jest ustalenie charakterystyki użytkownika danego budynku, ponieważ to ten element wpływa na temperaturę pomieszczenia jaka ma być osiągnięta. W zależności od przeznaczenia może to być tylko  $17^{\circ}\text{C}$  [4].

W wysokich, słabo izolowanych lub użytkowanych okresowo obiektach, takich jak hale przemysłowe należy uwzględnić wyraźne różnice pomiędzy temperaturą powietrza i temperaturą promieniowania [4]. Są to podstawowe parametry projektowe komfortu cieplnego [3]. Komfort cieplny jest określany za pomocą średniej arytmetycznej temperatury powietrza oraz temperatury promieniowania. Średnia ta nazywaną temperaturą odczuwalną została przedstawiona we wzorze (17). Ze wzoru tego wynika, że zwiększenie temperatury odczuwalnej może wynikać ze zwiększenia temperatury promieniowania o wartość, o którą została zmniejszona temperatura powietrza. Zależnie od aktywności fizycznej niższa temperatura powietrza jest postrzegana jako bardziej komfortowa [4]. Do pewnego momentu odbywa się to bez wpływu na odczuwalny komfort cieplny i prowadzi do oszczędności energii [9][3]. Temperatura odczuwalna na odpowiednim poziomie jest podstawowym i koniecznym warunkiem dla uzyskania komfortu cieplnego. Należy jednak zwrócić uwagę na asymetrię promieniowania i dopuszczalne natężenie promieniowania. Asymetria, która jest określana jako różnica temperatury efektywnej promieniowania, np. lewej i prawej półprzestrzeni, wpływa na wskaźnik PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) mówiący o przewidywanym procencie niezadowolonych z warunków cieplnych [5]. Przy projektowaniu ogrzewania promiennikami należy także unikać nadmiernego natężenia promieniowania [4].

## 1.2 Modelowy obiekt

Niniejsza praca uwzględnia model dwuwymiarowy widoczny na Rysunku 1, dlatego też najlepsze efekty daje rozpatrywanie w niej promienników rurowych, których to długości sięgają do 20 metrów [9]. Dzięki tak dużym wymiarom w porównaniu z promiennikami jasnymi zmniejsza się wpływ błędu jaki mógłby wynikać z braku uwzględnienia odbić z każdego kierunku. Wzięte pod uwagę strefy zacienienia rzucające przez paletę oraz straty ciepła przez przegrody dają możliwość na odpowiednie określenie temperatury, opromieniowania oraz temperatury promieniowania każdego elementu.

Rysunek 1 przedstawia model hali przemysłowej z promiennikiem ustawionym nad paletą. Opisany został każdy element wzięty pod uwagę przy analizowaniu i modelowaniu przepływu ciepła, a także została zaznaczona przykładowa droga promieni, które pozwalają pokazać powstałe strefy zacienienia. Nazwy te będą używane w dalszej części tekstu.



Rysunek 1: Dwuwymiarowy model hali przemysłowej.

### 1.3 Mechanizm wymiany ciepła w hali przemysłowej

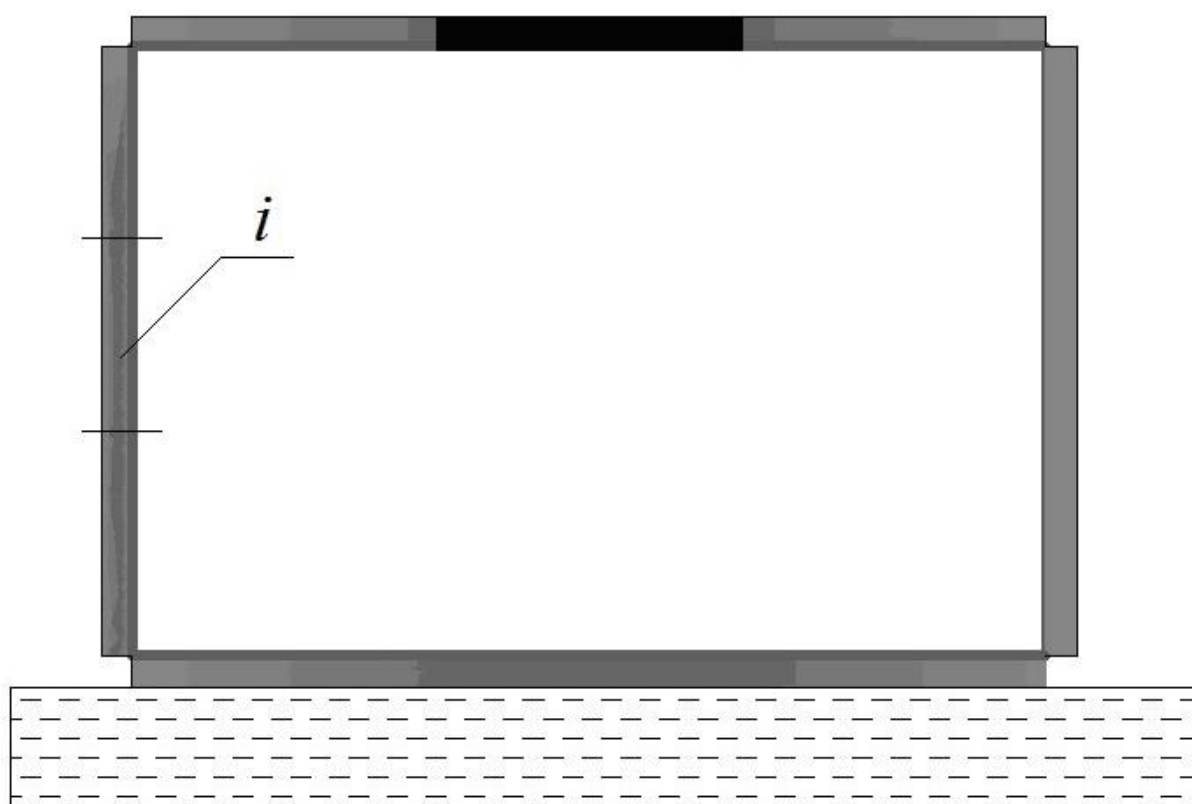
W rozpatrywanym przypadku jedynym źródłem ciepła jest promiennik lub dwa promienniki podczerwieni umieszczone na suficie. W obliczeniach przyjęto, że promiennik jest w tej samej płaszczyźnie co sufit. Z trzech stron, tj. ścian i sufitu następuje przenikanie ciepła do otoczenia, którego temperaturę domyślnie przyjęto dla III strefy klimatycznej [7]. Natomiast wyznaczanie strat ciepła do gruntu, które opisuje norma [6] sprowadzono do podziału na jednowymiarowe elementy przenikania ciepła, czyli podłogę i warstwę ziemi. Więcej szczegółów o sposobie przenikania ciepła do gruntu opisano w rozdziale 1.5, w którym zostały opisane regulacje prawne dotyczące wymiany ciepła w budownictwie.

Określenie współczynnika przewodzenia ciepła materiału na paletce mogłoby być kłopotliwe z uwagi na to, że jest to element bez bezpośredniego kontaktu z powietrzem zewnętrznym. Jego wpływ na ogólną temperaturę w obiekcie determinowany jest głównie przez jego kształt i rozmiar, które to wpływają na powstawanie stref zacienienia. Dlatego też przyjęto na stałym poziomie dwa różne współczynniki przewodzenia ciepła palety w zależności od kierunku przepływu ciepła. Współczynnik przewodzenia ciepła dobrze przewodzących materiałów  $\lambda = 100 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  dla kierunku pionowego, aby z jednej strony nie izolować całkowicie podłogi w miejscu postawienia palety, a z drugiej strony uwzględnić straty ciepła przez paletę do gruntu w tym miejscu. W kierunku poziomym przyjęto współczynnik przewodzenia ciepła dla materiałów stanowiących pewną izolację równy  $\lambda = 0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , aby wyższe temperatury boku palety osiągnięte w przypadku większego padającego na nie opromieniowania nie

wpływały znacząco na temperaturę na drugim brzegu (przegrody) palety. Co w stanie ustalonym powodowałoby wyrównywanie temperatury boków palety i utrudniałoby odpowiednią interpretację wpływu promieniowania.

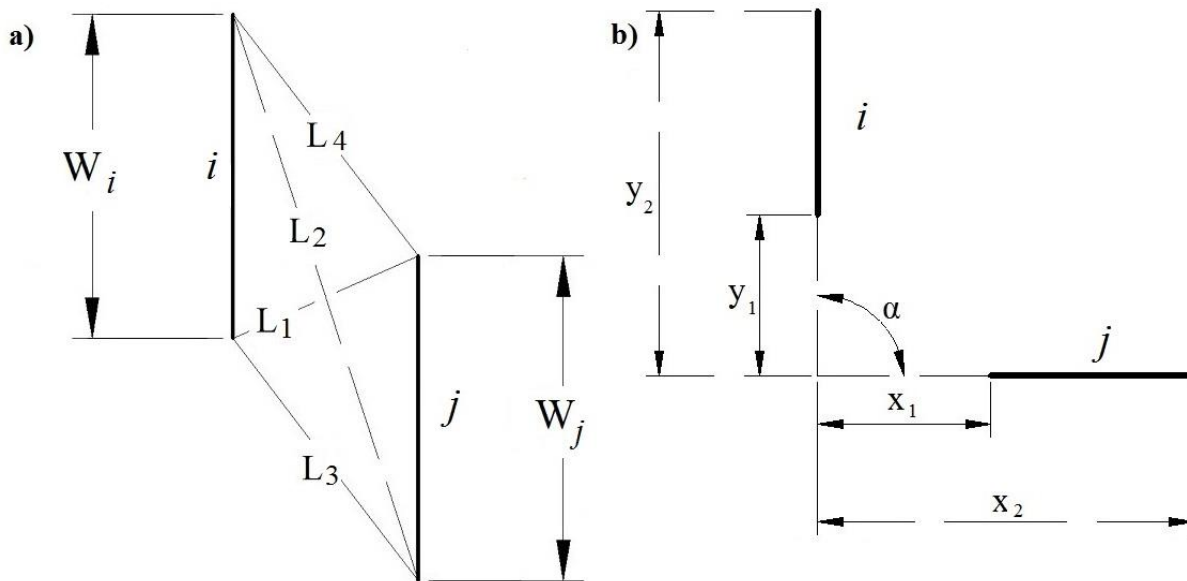
W celu wygody opisu geometrii i bardziej obrazowego przedstawieni układu w dalszej części tekstu podstawowa część podziału hali będzie nazywana na zmianę „elementem podziału” lub „płytką” zaznaczona na Rysunku 2 jako „ $i$ ”.

Aby przedstawić równania użyte w algorytmie posłużono się pomniejszoną i uproszczoną o brak palety geometrią widoczną na Rysunku 2. Prezentuje on pomieszczenie z centralnie umieszczonym na suficie promiennikiem. Po lewej stronie hali na ścianie zaznaczono jeden z elementów, na który podczas liczenia zostaje podzielona hala. Wszystkie elementy podziału mają zawsze identyczne wymiary.



Rysunek 2: Hala przemysłowa z zaznaczonymi elementem podziału.

Pierwszym krokiem jest wyznaczenie stosunków konfiguracji pomiędzy elementami podziału. Korzystając z [8] w równaniach (1) oraz (2) uwzględniono występowanie dwóch możliwości ustawienia elementów hali, to znaczy przedstawione na Rysunku 3 w przypadku a) dwie nieskończenie długie płytki które są do siebie równoległe oraz przedstawione na Rysunku 3 w przypadku b) dwie nieskończenie długie płytki, które są do siebie prostopadłe. Możliwe ustawienia elementów przedstawiono dla elementu  $i$  z Rysunku 2. Dla przejrzystości proporcje z Rysunku 2 nie zostały zachowane.



Rysunek 3: Ustawienia płytek wraz z oznaczeniami wykorzystanymi w równaniach (1) i (2). Dwie płytki równoległe przypadek a) oraz dwie płytki prostopadłe przypadek b).

W przypadku a) z Rysunku 3, kiedy płytki są do siebie równoległe stosunek konfiguracji przyjmuje postać:

$$F_{j-i} = \frac{L_1 + L_2 - L_3 - L_4}{2 \cdot W_j} \quad (1)$$

$W_j$  – szerokość elementu „j”, m

natomiast w momencie, kiedy płytki są do siebie prostopadłe to znaczy kąt  $\alpha = 90^\circ$ , jak zostało przedstawione na Rysunku 3 w przypadku b), to stosunek konfiguracji określamy jako:

$$F_{j-i} = \frac{(x_1^2 + y_2^2)^{\frac{1}{2}} + (x_2^2 + y_1^2)^{\frac{1}{2}} - (x_2^2 + y_2^2)^{\frac{1}{2}} - (x_1^2 + y_1^2)^{\frac{1}{2}}}{2 \cdot (x_2 - x_1)} \quad (2)$$

W algorytmie w celu skrócenia obliczeń wykorzystana została zasada wzajemności [2], którą zgodnie z wcześniejszym założeniem, że wszystkie płytki mają takie same wymiary, a więc  $A_i = A_j$  opisuje równanie:

$$F_{i-j} = F_{j-i} \quad (3)$$

$F_{i-j}$  - część jasności powierzchni „i” trafiającej na powierzchnię „j” (stosunek konfiguracji), -  
 $F_{j-i}$  - część jasności powierzchni „j” trafiającej na powierzchnię „i” (stosunek konfiguracji), -

Kolejny etap to rozpisanie równań bilansu jasności [2], jest on układany dla wszystkich płytek poza płytkami promiennika, którego jasność promieniowania jest znana, a opromieniowanie pomijalnie małe, ponieważ to promiennik jest jedynym źródłem ciepła, a jego powierzchnia jest niewielka w stosunku do powierzchni całego układu:

$$\dot{H}_i = \dot{E}_i + r_i \cdot \dot{B}_i \quad (4)$$

$\dot{B}_i$  – opromieniowanie powierzchni  $i$ , W

$\dot{E}_i$  – emisja własna powierzchni  $i$ , W

$\dot{H}_i$  – jasność promieniowania powierzchni  $i$ , W

$r_i$  – refleksyjność powierzchni  $i$ , -

gdzie emisja własna jest równa [2]:

$$\dot{E}_i = \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T_i^4 \cdot A_i \quad (5)$$

$\varepsilon$  – emisyjność, -

$\sigma$  – stała Stefana-Boltzmana,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ , W/(m<sup>2</sup> · K<sup>4</sup>)

$T_i$  – temperatura powierzchni  $i$ , K

$A_i$  – powierzchnia  $i$ -tej płytki, m<sup>2</sup>

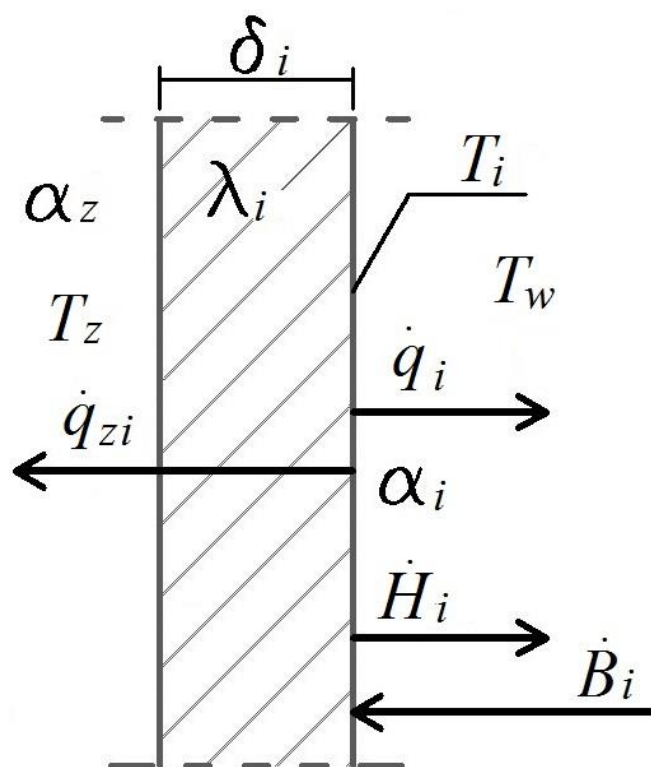
w obliczeniach pomijane jest opromieniowanie powierzchni promiennika. Dla pozostałych elementów jest liczone, jako [2]:

$$\dot{B}_i = \sum_j \dot{H}_j \cdot F_{j-i} \quad (6)$$

Przyjęto, że transmisyjność jest równa zero  $t = 0$  oraz emisyjność jest równa absorpcyjności  $\varepsilon = a$  [2], dlatego refleksyjność określa zależność:

$$r = 1 - \varepsilon \quad (7)$$

Sposób przenikania ciepła przez przegrody został przedstawiony na dwóch przykładach dla sufitu i ścian oraz osobno dla podłogi. Na Rysunku 4 zostały przedstawione kierunki strumieni ciepła oraz gęstości strumieni ciepła w bilansie energii powierzchni ściany lub sufitu. Przykład dla  $i$ -tej płytki z Rysunku 2.



Rysunek 4: Bilans energii dla ściany lub sufitu. Przykład dla  $i$ -tej płytki.

$\dot{q}_i$  – gęstość strumienia ciepła wymienianego pomiędzy elementem  $i$  a powietrzem wewnątrz hali na drodze konwekcji,  $\text{W}/\text{m}^2$

$\dot{q}_{zi}$  – gęstość strumienia ciepła wymienianego pomiędzy elementem  $i$  a otoczeniem,  $\text{W}/\text{m}^2$   
 $\alpha_i$  – współczynnik wnikania ciepła pomiędzy elementem  $i$  a powietrzem w hali,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$\alpha_z$  – współczynnik wnikania ciepła między elementem hali a powietrzem otoczenia,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$\delta_i$  – grubość elementu  $i$ , m

$\lambda_i$  – współczynnik przewodzenia ciepła elementu  $i$ ,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Gęstości strumienia ciepła na Rysunku 4 wynoszą odpowiednio:

$$\dot{q}_i = \frac{T_i - T_w}{\frac{1}{\alpha_i}} \quad (8)$$

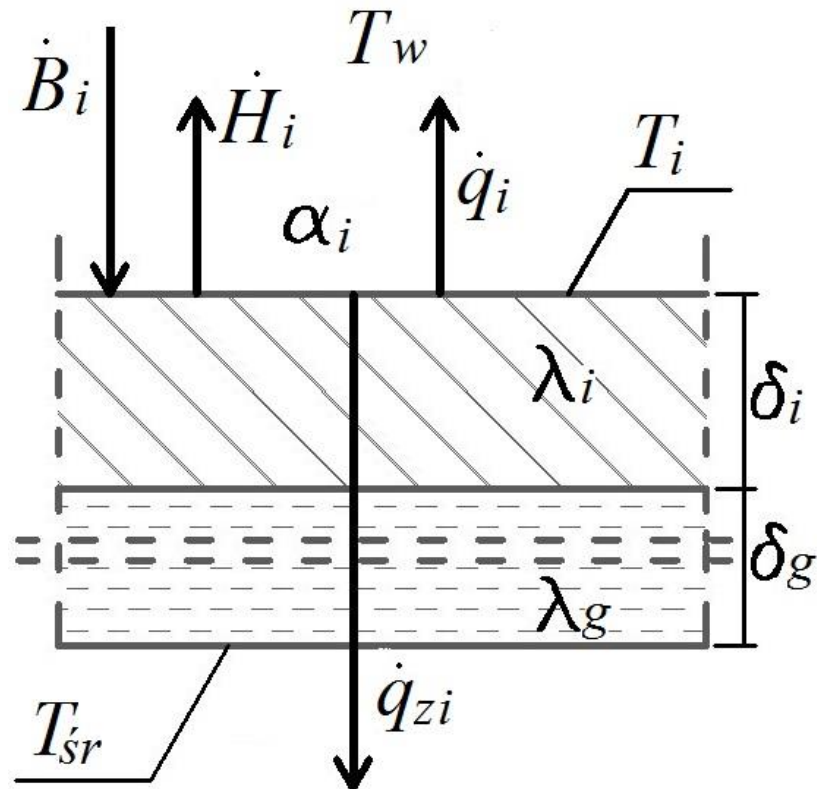
$$\dot{q}_{zi} = \frac{T_i - T_z}{\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_z}} \quad (9)$$



dlatego bilans energii wykorzystując równania (7) i (8) jest równy:

$$A_i \cdot \frac{T_i - T_w}{\frac{1}{\alpha_i}} + A_i \cdot \frac{T_i - T_z}{\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_z}} = -(\dot{H}_i - \dot{B}_i) \quad (10)$$

Na Rysunku 5 podobnie jak na Rysunku 4 zostały opisane oznaczenia i zaznaczone kierunki przepływu ciepła w bilansie energii dla podłogi. Przykład dla  $i$ -tego elementu położonego na podłodze.



Rysunek 5: Bilans energii dla podłogi. Element  $i$  znajduje się na podłodze.

$\delta_g$  – grubość warstwy ziemi, m

$\lambda_g$  – współczynnik przewodzenia ciepła gruntu, W/(m·K)

$T_{sr}$  – temperatura średnioroczna powietrza zewnętrznego jako temperatura gruntu [1], K

Gęstości strumienia ciepła z Rysunku 5 wynoszą odpowiednio:

$$\dot{q}_i = \frac{T_i - T_w}{\frac{1}{\alpha_i}} \quad (11)$$

$$\dot{q}_{zi} = \frac{T_i - T_{sr}}{\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{\delta_g}{\lambda_g}} \quad (12)$$

Zapisując bilans energii dla podłogi z wykorzystaniem równań (11) i (12) otrzymujemy:

$$A_i \cdot \frac{T_i - T_w}{\frac{1}{\alpha_i}} + A_i \cdot \frac{T_i - T_{sr}}{\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{\delta_g}{\lambda_g}} = -(\dot{H}_i - \dot{B}_i) \quad (13)$$

Równanie wiążące temperaturę wewnętrzną w hali z temperaturami elementów budynku oraz jasnością promieniowania promiennika:

$$\dot{H}_{promiennika} = \sum_i -(\dot{H}_i - \dot{B}_i) - \sum_i A_i \cdot \frac{T_i - T_w}{\frac{1}{\alpha_i}} \quad (14)$$

Wyznaczona została także temperatura promieniowania  $T_R$ , która jest zastępczą temperaturą wszystkich powierzchni wewnętrznych hali (widocznych z danego miejsca). Temperatura ta odpowiada zastępczej średniej temperaturze dużego otoczenia danej powierzchni hali odpowiadającej za wymianę ciepła na drodze promieniowania pomiędzy wybranym elementem a tym otoczeniem. Temperatura promieniowania została wyznaczona, z bilansu energii:

$$A_i (\dot{e}_i - \dot{b}_i) = A_i \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_i^4 - T_{Ri}^4) \quad (15)$$

po przekształceniu równania (15),  $T_{Ri}$  jest równe:

$$T_{Ri} = \sqrt[4]{\frac{\dot{B}_i}{\varepsilon_i \cdot \sigma \cdot A_i}} \quad (16)$$

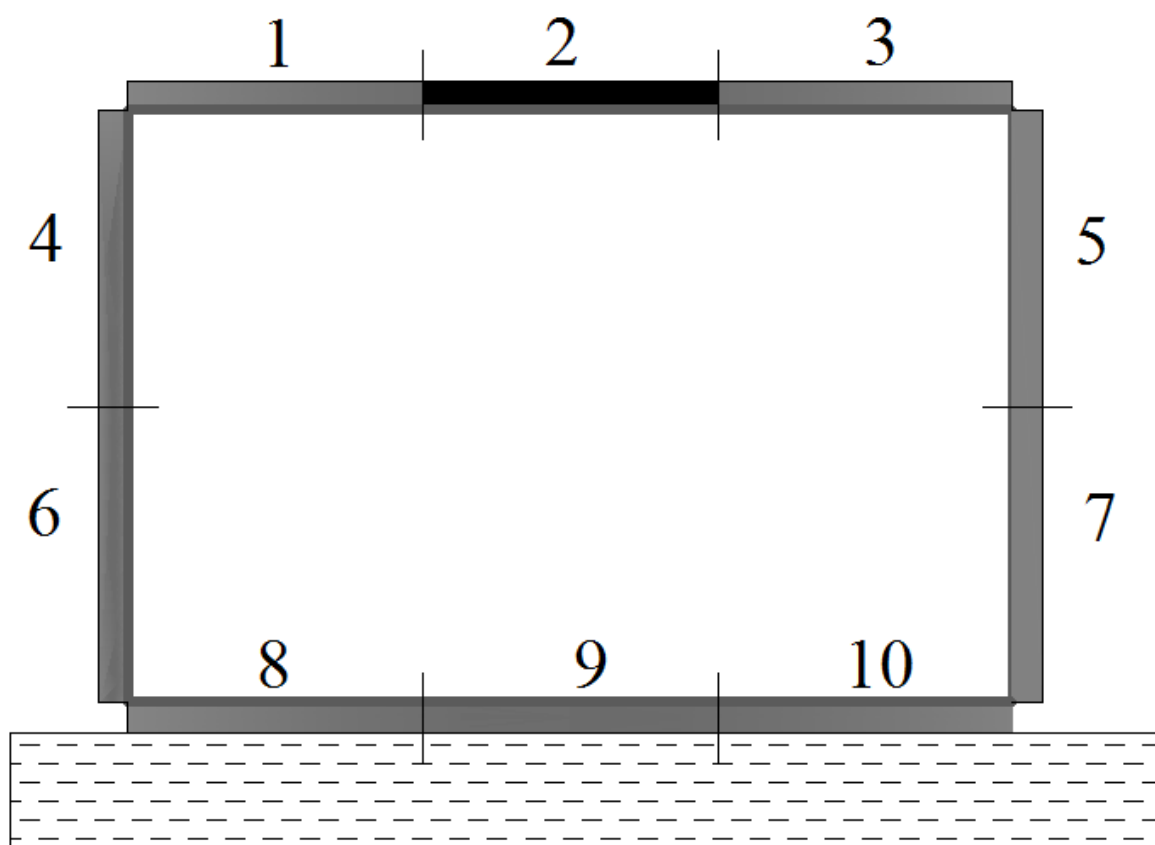
temperaturę promieniowania wykorzystuje się do obliczenia temperatury odczuwalnej, która określona jest wzorem:

$$T_{odcz-i} = \frac{(T_w + T_{Ri})}{2} \quad (17)$$

#### 1.4 Model EES

Model przedstawiony na Rysunku 6 prezentuje pomieszczenie o wymiarach 2x3 m z centralnie umieszczonym na suficie promiennikiem reprezentowanym przez płytkę numer 2.

został wykonany w programie Engineering Equation Solver, wykorzystując równania omówione w punkcie 1.2. Obliczony przykład zostanie porównany przy wykorzystaniu identycznych danych z wynikami uzyskanymi w zaimplementowanym algorytmie w języku VBA w programie MS Excel. Porównanie ma na celu określenie dokładności i poprawności stworzonego algorytmu.



Rysunek 6: Schemat pomieszczenia użyty do obliczeń sprawdzających dokładność algorytmu.

Przyjęte dane:

$T_z = 253 \text{ K}$  – temperatura zewnętrzna otoczenia dla III strefy klimatycznej,

$T_{sr} = 280,6 \text{ K}$  – temperatura średnioroczna powietrza zewnętrznego,

$\alpha_z = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  – współczynnik wnikania ciepła do powietrza zewnętrznego,

$\delta_g = 7 \text{ m}$  – grubość warstwy ziemi,

$\varepsilon = 0,95$  – emisyjność dla każdej płytki,

$\lambda_g = 2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  – współczynnik przewodzenia ciepła dla gruntu,

Dla płytek sufitowych, tj.  $i = 1, 2, 3$ :

$\alpha_i = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  – współczynnik wnikania ciepła pomiędzy powietrzem w hali a sufitem,

$\delta_i = 0,1 \text{ m}$  – grubość sufitu,

$\lambda_i = 0,03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  – współczynnik przewodzenia ciepła dla sufitu,

Dla płytek na bokach hali, tj.  $i = 4, 5, 6, 7$ :

$\alpha_i = 7,69 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  – współczynnik wnikania ciepła pomiędzy powietrzem w hali a ścianą,

$\delta_i = 0,1 \text{ m}$  – grubość ścian,

$\lambda_i = 0,03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  – współczynnik przewodzenia ciepła dla ścian,

Dla płytek na podłodze, tj.  $i = 8, 9, 10$ :

$\alpha_i = 10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  – współczynnik wnikania ciepła pomiędzy powietrzem w hali a podłogą,

$\delta_i = 0,3 \text{ m}$  – grubość podłogi,

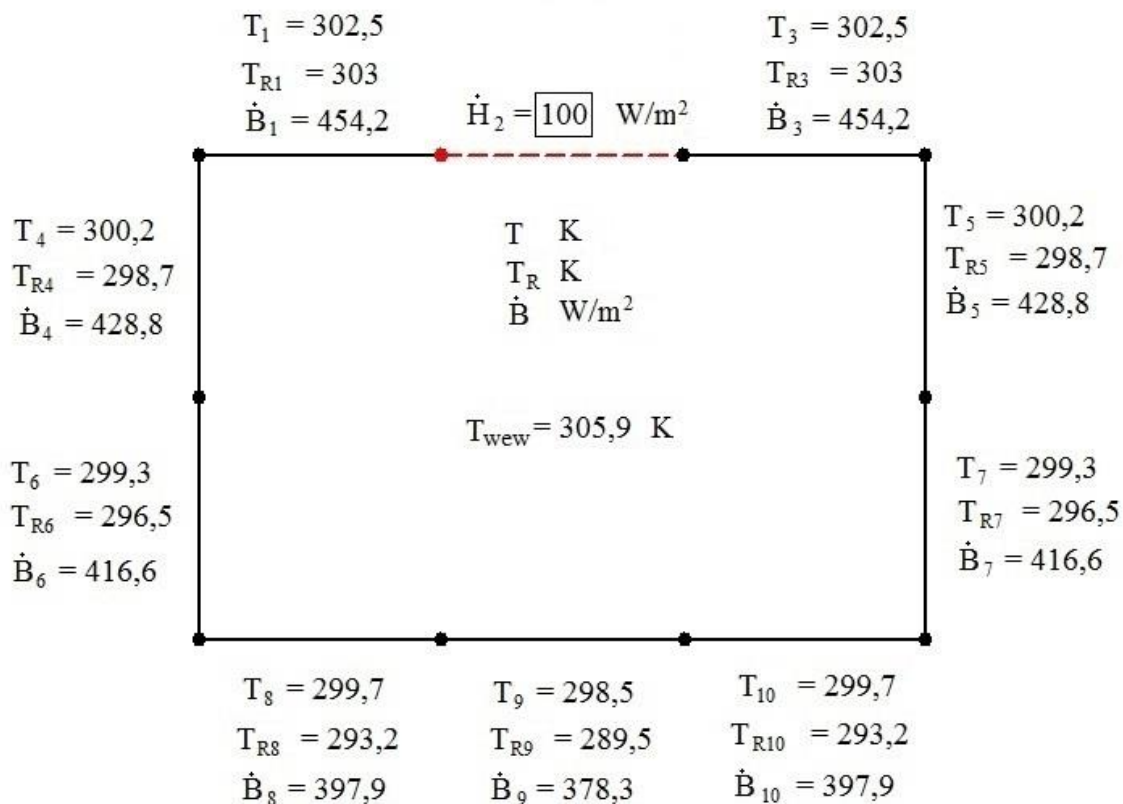
$\lambda_i = 1,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  – współczynnik przewodzenia ciepła dla podłogi.

Współczynniki przewodzenia ciepła i grubości ścian i sufitu przyjęto według danych dla płyt warstwowych znajdujących się w kartach katalogowych producentów hal przemysłowych [10][11]. Płyty te mają grubości od 0,04 m do ponad 0,1 m i składają się z dwóch okładzin z blachy stalowej oraz z rdzenia konstrukcyjno-izolacyjnego [11]. Zastępcze współczynniki przewodzenia ciepła dla płyt mieszczą się w granicach  $\lambda = 0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  dla płyt z rdzeniem styropianowym, do około  $\lambda = 0,022 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  dla płyt ze sztywną pianką poliuretanową.

Do najważniejszych elementów konstrukcji podłogi należą płyta betonowa oraz podbudowa. Grubość płyty betonowej wynosi od 0,12 do 0,3 m, natomiast grubość podbudowy 0,15-0,4 m [12]. Podbudowa może się składać z odpowiednio przygotowanej mieszanki piaszczysto-żwirowej, dlatego w przyjętych danych została zaliczona do warstwy ziemi o współczynniku przewodzenia ciepła  $\lambda_g = 2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Współczynnik przewodzenia ciepła dla podłogi został więc określony dla betonu zwykłego z kruszywa kamiennego według normy [6].

Na Rysunku 7 zgodnie z numeracją z Rysunku 6 umieszczono wyniki uzyskane w programie EES, tj. temperaturę powierzchni płytek oznaczoną jako  $T_i$ , temperaturę radiacyjną  $T_{Ri}$  wyznaczoną według wzoru (16) oraz opromieniowanie oznaczone jako  $\dot{B}_i$ . Linia przerywaną zaznaczono promiennik (płytką numer 2), nad którym wpisano założoną gęstość strumienia ciepła oznaczoną jako  $\dot{H}_2$ .

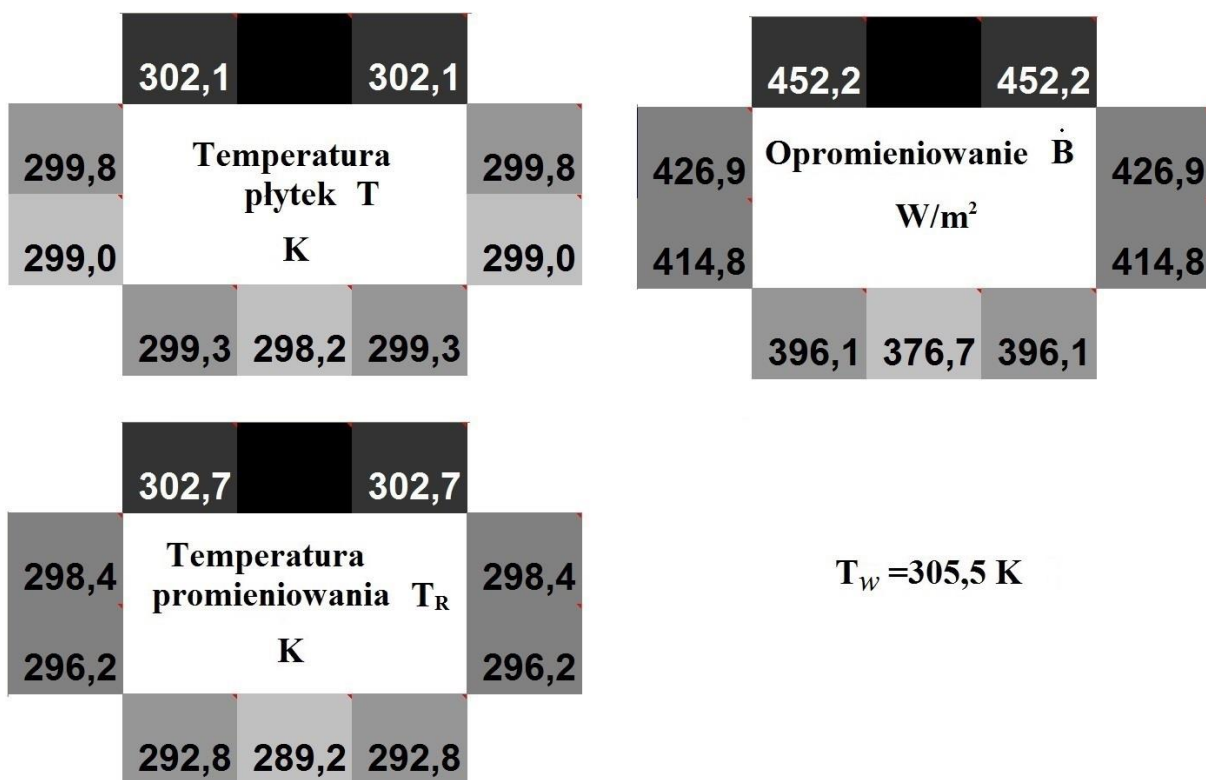
Nie jest to geometria rzeczywista, a jedynie służąca do określenia poprawności obliczeń, dlatego uzyskane wyniki nie będą omówione pod kątem wymiany ciepła, a jedynie pod kątem zgodności wyników.



Rysunek 7: Wyniki uzyskane w programie EES dla przykładowej geometrii.

Dla zwiększenia przejrzystości, jednostki dla temperatury powierzchni płytek, temperatury promieniowania i opromieniowania opisano osobno na środku Rysunku 7.

Wyniki uzyskane w programie MS Excel przedstawia Rysunek 8 z numerowaniem płytek analogicznym do Rysunku 6. Promiennik został oznaczony kolorem czarnym, wewnątrz pól opisano do czego odnoszą się wyniki i jakie mają jednostki.



Rysunek 8: Wyniki dla przykładowej geometrii uzyskane w programie Excel.

Porównując Rysunki 7 i 8 można zauważyć, że wyniki są do siebie bardzo zbliżone. Temperatury nie różnią się bardziej niż o 1 K a opromieniowanie o 2 W/m<sup>2</sup>. Różnice wynikają z dokładności wprowadzonej w narzędziu programu MS Excel - Solver, który jest wykorzystywany do rozwiązywania układu równań oraz w szczególności z wprowadzonego punktu startowego. Trzeba jednak zauważyć, że jest to nieduży symetryczny układ, gdzie różnice wartości nie są duże. W układach ze strefami zacienienia, ze względu na sposób działania Solvera, może miejscami dochodzić do zwiększenia błędu, np. na granicy płytek zasłoniętej i opromieniowanej.

Dodatkowy błąd w układzie ze strefami zacienionymi może także wynikać z niespełnienia we wszystkich płytkach zasady zamkniętości. W programie obliczeniowym przyjęto zasadę, że jeśli płytki nie są dla siebie widoczne w całości to stosunek konfiguracji pomiędzy nimi wynosi zero. Im większa ilość płytek, na którą podzielona jest hala, tym poszczególne stosunki konfiguracji między płytkami są mniejsze, a to z kolei wpływa na mniejszy błąd całego układu. Suma wszystkich stosunków konfiguracji według zasady zamkniętości powinna być równa liczbie płytek. W rzeczywistości jednak z powodu przyjętego sposobu wyznaczania stref zacienienia różnica pomiędzy teoretyczną sumą stosunków konfiguracji a rzeczywistą jest równa około 0,7-1,1. W porównaniu do całego układu, który ma np. 200 elementów (płytek) to niewiele. Pamiętać jednak trzeba, że błąd ten nie jest rozdzielony równo na każdą płytkę a największa niedokładność występuje na suficie nad paletą, ponieważ bywa, że z dwóch stron palety, uznane za niewidzące się płytki, pada stosunkowo duże potencjalne promieniowanie.

## 1.5 Regulacje prawne w budownictwie dotyczące wymiany ciepła

Producenci podając parametry cieplne ścian i sufitów hal wykorzystują współczynnik przenikania ciepła  $U$   $W/(m^2 \cdot K)$  w literaturze technicznej (z dziedziny wymiany ciepła) oznaczany zwykle jako  $k$ . Aby odpowiednio zinterpretować podane współczynniki i uzyskać dodatkowe informacje na temat użytych do budowy hal materiałów należy zapoznać się z normami obowiązującymi w Polsce. Oprócz uwzględnienia przenikania przez ściany należy także uwzględnić przenikanie ciepła do gruntu.

W tabeli 1 zamieszczono określone normą [6] opory przejmowania ciepła na powierzchni, które to zostały następnie przeliczone na współczynniki wnikania ciepła. Dla omawianych przypadków geometrii oraz temperatur przyjęto, że kierunek strumienia ciepła dla sufitu i podłogi będzie zawsze pionowy o zwrocie w górę. Założenie to wynika ze stałego usytuowania promiennika na suficie, dlatego podłoga na drodze radiacji nagrzewa się i oddaje ciepło na drodze konwekcji swobodnej do powietrza w hali. Natomiast na sufit trafia promieniowanie wyłącznie odbite z innych elementów hali, a jego temperatura rośnie także przez unoszące się w górę podgrzane powietrze. Prowadzi to do sytuacji, gdzie pionowy kierunek strumienia ciepła będzie miał zawsze zwrot w górę. Dla ścian natomiast przyjęto poziomy kierunek strumienia ciepła.

Tabela 1: Opory przejmowania ciepła na powierzchni [6].

Opór przejmowania ciepła, $(m^2 \cdot K)/W$	Kierunek strumienia ciepła		
	W górę	Poziomo	W dół
Wewnątrz $\frac{1}{\alpha} = R_{si}$	0,1	0,13	0,17
Na zewnątrz $\frac{1}{\alpha} = R_{se}$	0,04	0,04	0,04

W przypadku strat ciepła do gruntu nie uwzględniano całego algorytmu przedstawionego w normie [7] z uwagi na rozpatrywanie układu dwuwymiarowego hali, ale dokonano porównania przykładowego obiektu, tj. hali o wymiarach podłogi 30x80 m i wyznaczono grubość warstwy ziemi na poziomie około 7,5 metra. Nie odbiega to znacznie od funkcjonującego w polskiej literaturze z zakresu budownictwa i inżynierii środowiska przybliżenia, które mówi o stałej temperaturze gruntu na głębokości poniżej 8 metrów równej średniorocznej temperaturze powietrza [1].

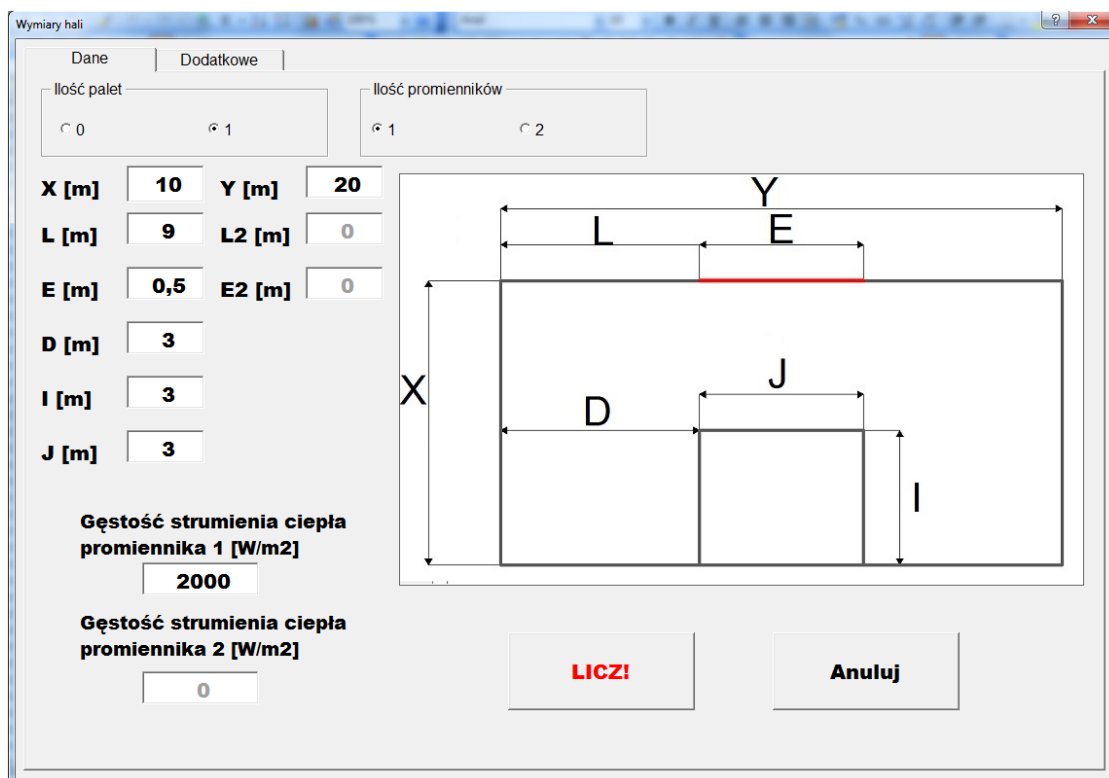
## 2 Prezentacja programu obliczeniowego

### 2.1 Opis programu

Przed pierwszym włączeniem konieczne należy sprawdzić czy Excel posiada zainstalowany dodatek Solver, czy w oknie „Project – VBAProject” edytora VisualBasic istnieje opcja „Reference to solver.xla” oraz czy są włączone odwołania cykliczne (iteracje).

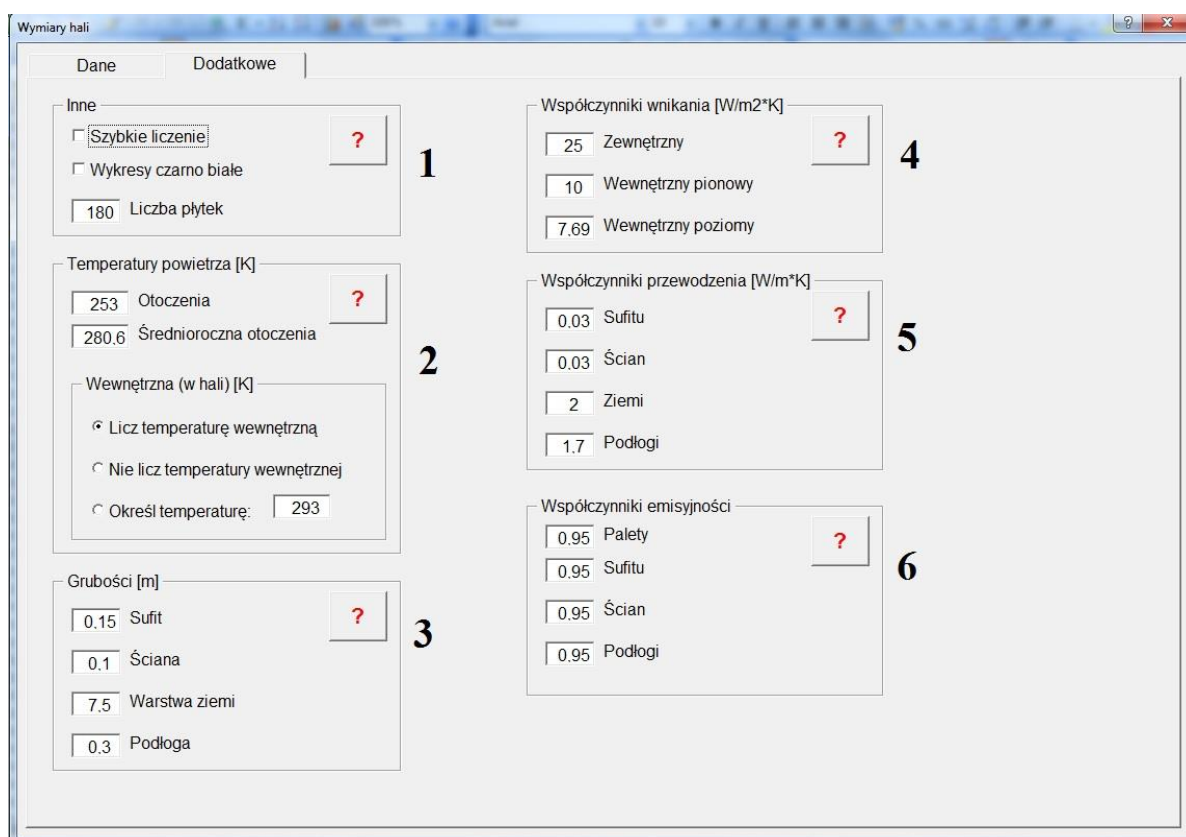
Po otwarciu pliku pojawi się ekran informujący o tytule pracy, imię i nazwisko autora oraz opiekuna pracy magisterskiej. Należy kliknąć przycisk „Przejdź do obliczeń”. Nastąpi wtedy otwarcie się okna głównego zatytułowanego „Wymiary hali”, zawierającego dwie zakładki: „Dane” przedstawione na Rysunku 9 oraz „Dodatkowe” przedstawione na Rysunku 10.

W pierwszej zakładce, którą przedstawia Rysunek 9, istnieje możliwość doboru najważniejszych parametrów, takich jak: ilość palet i promienników, rozmiarów hali, rozmiarów promienników i gęstości strumieni ciepła. Po prawej stronie pokazuje się odpowiedni do zaznaczonej ilości palet i promienników rysunek z oznaczeniami. Po wpisaniu właściwych danych, aby uruchomić obliczenia należy kliknąć przycisk „LICZ”.



Rysunek 9: Okno główne zawierające najważniejsze dane odnośnie modelowanego obiektu.





Rysunek 10: Zakładka „Dodatkowe” zawierająca szereg parametrów określających układ oraz wpływających na działanie programu.

Zakładka „Dodatkowe”, przedstawiona na Rysunku 10, zawiera 6 pól umożliwiających zmianę sposobu liczenia, parametrów otoczenia i materiałów, z których zbudowany jest obiekt. W każdym polu znajduje się pomoc opisująca znaczenie poszczególnej opcji. W polu numer 1 można określić dokładność działania programu poprzez określenie liczby płytek, na które ma być podzielona hala. Maksymalna liczba płytek może być równa 200. Jest to ograniczenie wbudowanego w program MS Excel Solvera. Trzeba pamiętać jednak, że zwiększając liczbę elementów, na które zostanie podzielona hala zwiększa się także czas obliczeń.

Znajduje się tam również opcja „Szybkie liczenie”, która pozwala na zmniejszenie czasu obliczeń o blisko połowę kosztem dokładności wyników. W przypadku temperatur jest to najczęściej 3-5 K. Jest to przydatna opcja, jeśli użytkownik chce sprawdzić czy podane założenia dają rzeczywiste wyniki. Polega ona na zmianie ustawień narzędzia Solver na mniej dokładne. Mogą wystąpić skrajne sytuacje zależne od ustawień parametrów hali, kiedy wyniki uzyskane przy włączonej opcji „Szybkie liczenie” będą równie dokładne jak przy wyłączonej, a także, gdy będą posiadały większy błąd niż 3-5 K dla pola temperatur. Dlatego nie zaleca się używania tej opcji przy ostatecznych obliczeniach.

Opcja „wykresy czarno białe” pozwala od razu przedstawić wyniki w odcieniach szarości. Istnieje możliwość późniejszej zmiany przedstawienia wyników bez konieczności przeliczania układu.

W obszarze oznaczonym jako numer drugi można zmienić temperaturę zewnętrzną powietrza, średnioroczną powietrza zewnętrznego oraz wewnętrzną hali. Dwie pierwsze moż-

liwości pozwalają na umiejscowienie hali w dowolnej strefie klimatycznej. Użytkownik może wybrać także trzy sposoby liczenia temperatury wewnętrznej. To znaczy, że może ją określić na podstawie konwekcji z nagrzanych przez promieniowanie elementów hali, określić stałą wartość temperatury, np. kiedy hala jest często wietrzona lub całkowicie pominąć wymianę ciepła z poszczególnych elementów do wnętrza hali.

W polach 3, 4, 5, 6 określone są poszczególne parametry elementów obiektu, otoczenia i gruntu pod budynkiem. Domyślne wartości odpowiadają obowiązującym normom oraz parametrom najczęściej występującym na rynku halom przemysłowym.

## **2.2 Wyniki**

Wyniki są prezentowane w czterech Arkuszach nazwanych „Temperatura”, „Opromieniowanie”, „Temperatura promieniowania” oraz „Wykres”. Za pomocą przycisków, znajdujących się w trzech pierwszych arkuszach, można wybrać sposób kolorowania wyników między barwami od niebieskiego do czerwonego lub w odcieniach szarości. W arkuszu „Wykres” przedstawione zostało porównanie rozkładów temperatury, opromieniowania i temperatury promieniowania na podłodze.

Po najechnięciu kursorem na każdą z płytek otwiera się komentarz z szeregiem informacji o parametrach zamodelowanej hali oraz o parametrach konkretnego elementu. Opcja ta umożliwia szybki podgląd wyników bez konieczności przełączania arkuszy za każdym razem.

W każdym rysunku zawierającym wyniki dodano zakresy wyników nad, obok i pod płytkami ze zwiększoną czcionką w celu lepszej czytelności. W programie Excel nie jest to konieczne ze względu na większe pole, na którym jest wyświetlany schemat oraz możliwość przybliżenia dowolnej części wyników.

Przy przedstawianiu wyników w odcieniach szarości promiennik zawsze oznaczany jest kolorem białym, jako puste miejsce na suficie.

Pierwszą zamodelowanym obiektem będzie hala bez palety o parametrach:

Wysokość:  $X = 10$  m

Szerokość:  $Y = 20$  m

Odległość lewej ściany do krawędzi promiennika:  $L = 9,5$  m

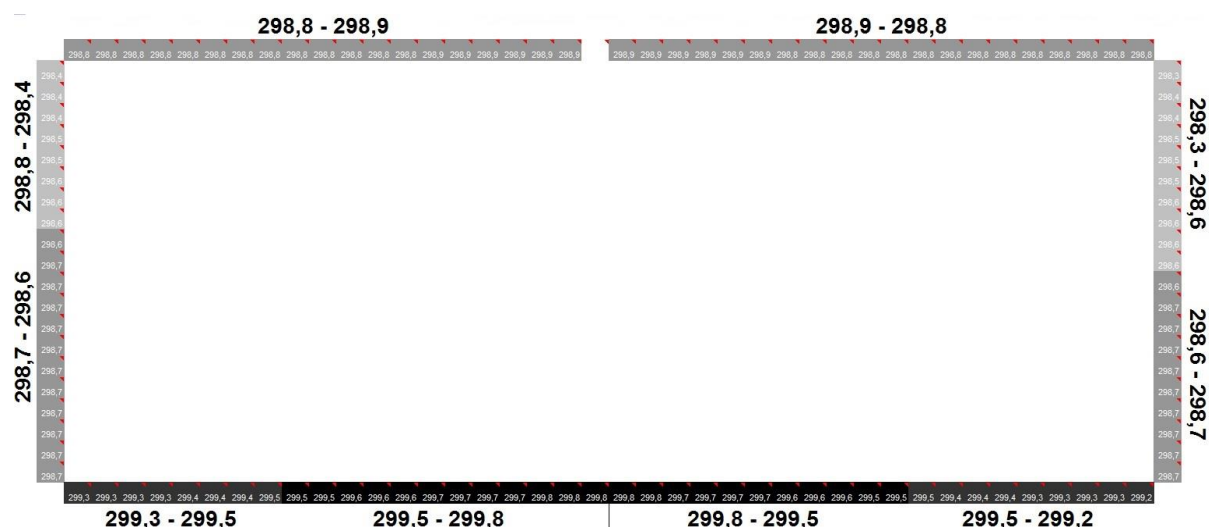
Szerokość promiennika:  $E = 0,5$  m. Rozmiary promiennika z [9].

Gęstość strumienia ciepła promiennika:  $\dot{q} = 1000$  W/m<sup>2</sup>. Gęstość strumienia ciepła promiennika została oszacowana na podstawie bilansu energii w hali dla stanu ustalonego.

Oznaczenia zgodne z opisem z Rysunku 9. Wartości innych współczynników przyjęto jak na Rysunku 10, zmieniono jedynie ilość płytek na 120 z powodu wystarczającej dokładności dla hali bez palety. Obiekt został podzielony na 120 płytek o wymiarze 0,5 m każda. Może wystąpić sytuacja, kiedy ilość płytek, na które zostanie podzielony układ będzie mniejsza niż założona przez użytkownika. Jest to spowodowane większą dbałością o proporcjonalność układu niż zmniejszania poszczególnych elementów.

Temperatura powietrza w hali wyniosła 299,4 K.

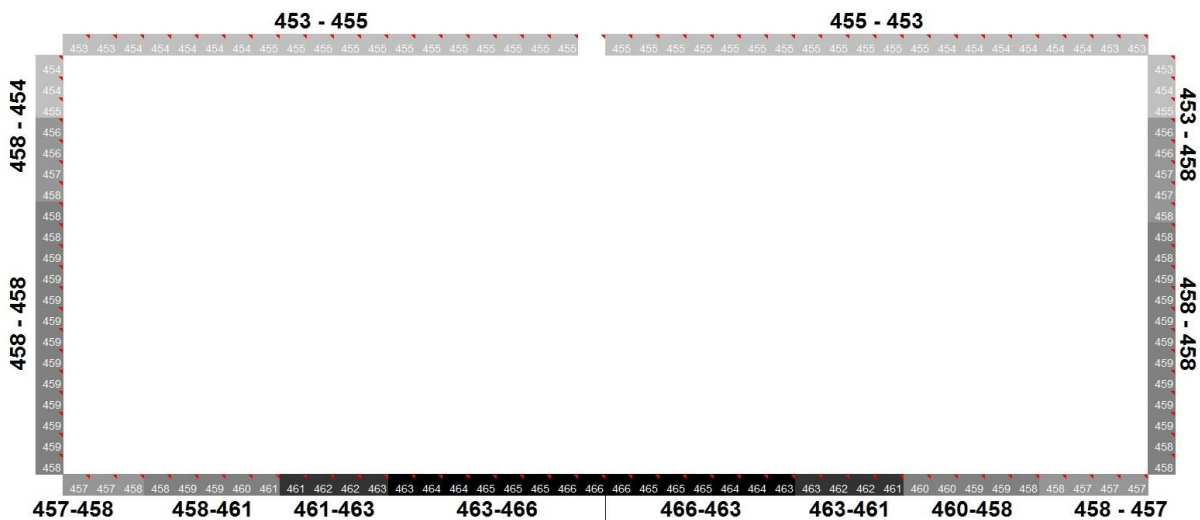
Rozkład temperatury płytek pokazano na Rysunku 11:



Rysunek 11: Rozkład temperatury płytek w hali. Wartości w K.

Na Rysunku 11, zawierającym rozkład temperatury płytek, można zauważyć, że największe wartości mają płytki na podłodze bezpośrednio pod promiennikiem. Temperatury te maleją wraz z oddalaniem się od środka hali. Najniższe temperatury są natomiast na górnej części lewej i prawej ściany a nie na suficie. Dzieje się tak, ponieważ wewnętrzny współczynnik wnikania ciepła z powietrza do ścian jest mniejszy niż pionowy wewnętrzny współczynnik wnikania ciepła dla sufitu. Dodatkowo na sufit trafia odbite wprost promieniowanie z podłogi, która ma wyższą temperaturę niż ściany.

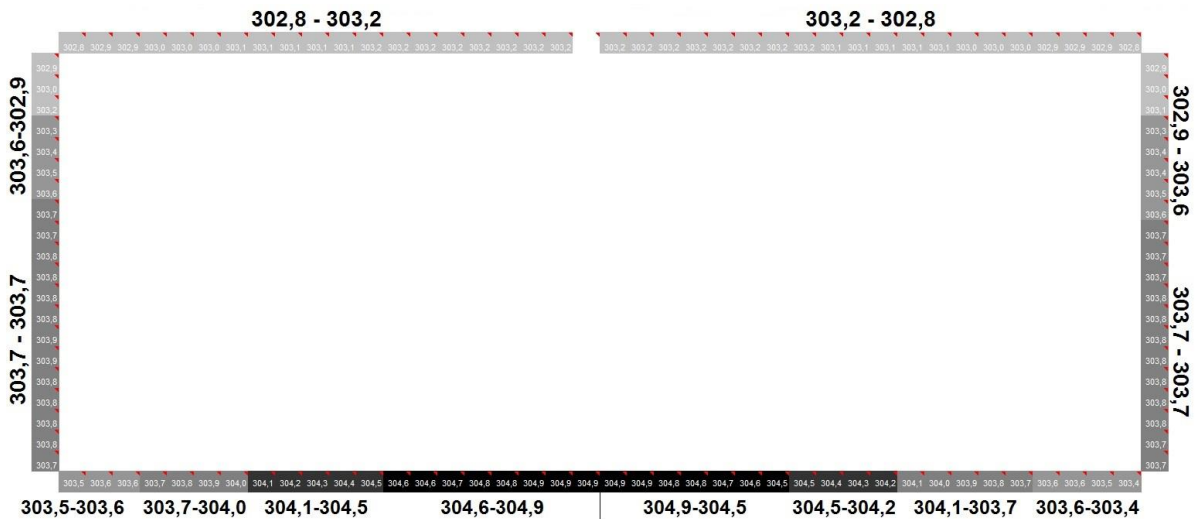
Rysunek 12 przedstawia opromieniowanie w hali:



Rysunek 12: Rozkład opromieniowania w hali. Wartości podane w  $W/m^2$ .

Podobnie jak w rozkładzie temperatury największe opromieniowanie jest bezpośrednio pod promiennikiem. W narożnikach u dołu hali większa wartość opromieniowania występuje na ścianach, a nie jak to było w przypadku temperatury na podłodze. Ma to związek z brakiem wpływu przenikania ciepła. Podobną sytuację można zauważyć w górnych narożnikach, gdzie wpływ konwekcji przesądza o wyższej temperaturze płytek sufitu niż sąsiadującej z nim płytki ściany a opromieniowanie jest tam najmniejsze.

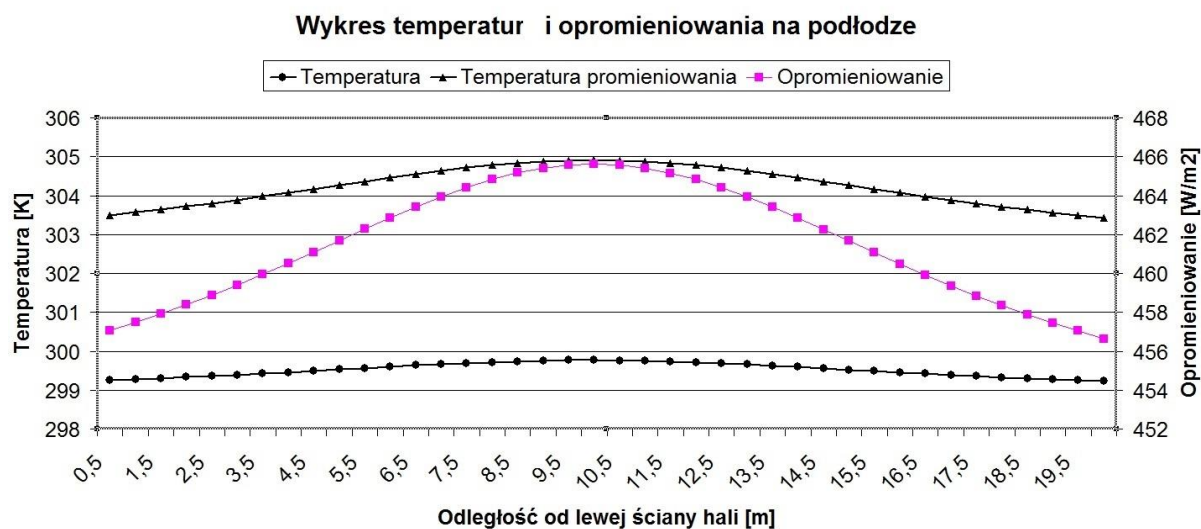
Rysunek 13 przedstawia temperaturę promieniowania w hali:



Rysunek 13: Rozkład temperatury promieniowania w hali. Wartości w K.

Rozkład temperatury promieniowania pokrywa się z rozkładem opromieniowania. Jak wynika z wzoru (16) duże znaczenie w tym przypadku ma emisyjność każdego elementu, która została przyjęta na poziomie ciemnej matowej farby, tj. 0,95. Wartości temperatury promieniowania są większe od wartości temperatury płytek z Rysunku 11.

Na Rysunku 14 przedstawiono wykres porównujący rozkład uzyskanych wyników na podłodze hali. Temperaturę zaznaczono linią z kołami, temperaturę promieniowania jako linię z trójkątami, a punkty na linii opromieniowania zaznaczono kwadratami.



Rysunek 14: Wykres rozkładu temperatury płytek, temperatury promieniowania i opromieniowania na podłodze.

Po lewej stronie znajduje się skala w K dla temperatur natomiast po prawej stronie została dodana skala w  $W/m^2$  dla opromieniowania. Na osi poziomej umieszczono odległości od lewej strony hali. Na wykresie można zauważyć, że temperatura opromieniowania jest wyższa i bardziej zmienna na szerokości całej podłogi niż temperatura poszczególnych płytek. Natomiast opromieniowanie, co było też widoczne na Rysunku 12, osiąga najwyższą wartość równą  $466 W/m^2$  na środku hali pod promiennikiem.

Drugim zamodelowanym obiektem będzie hala z paletą o parametrach:

Wysokość hali:  $X = 10$  m

Szerokość hali:  $Y = 20$  m

Wysokość palety:  $I = 4,2$  m

Szerokość palety:  $J = 2,8$  m

Odległość lewej ściany hali do krawędzi palety:  $D = 14$  m

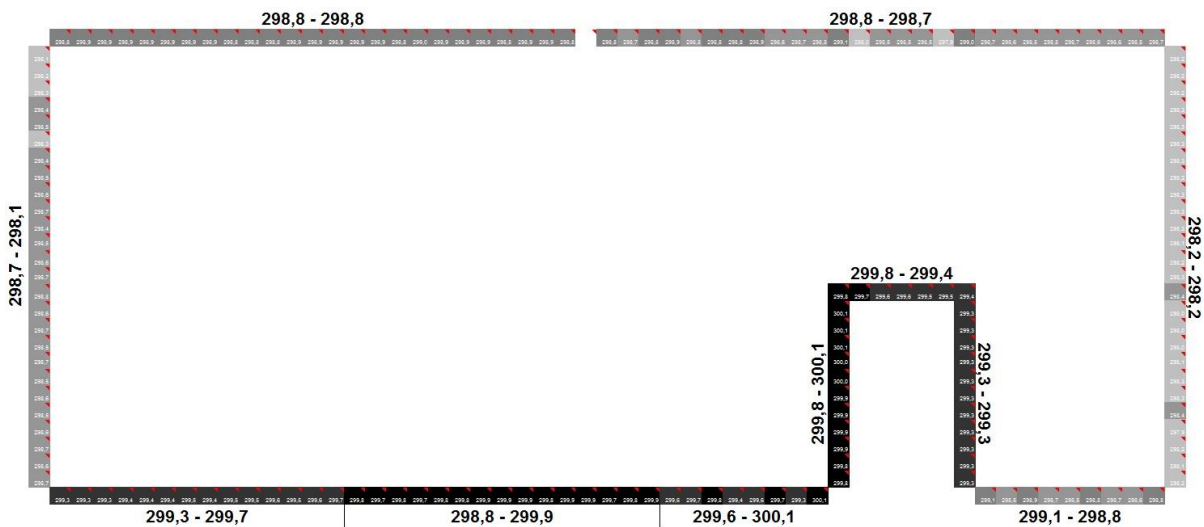
Odległość lewej ściany hali do krawędzi promiennika:  $L = 9,5$  m

Szerokość promiennika:  $E = 0,5$  m. Rozmiary promiennika z [9].

Gęstość strumienia ciepła promiennika:  $\dot{q} = 1000 W/m^2$ .

Oznaczenia zgodne z opisem z Rysunku 9. Wartości innych współczynników przyjęto jak na Rysunku 10. Ilość płytek wyznaczono na 180, co spowodowało podzielenie obiektu równo na 180 elementów o wymiarze 0,38 m każdy. Temperatura powietrza w hali wyniosła 299,5 K.

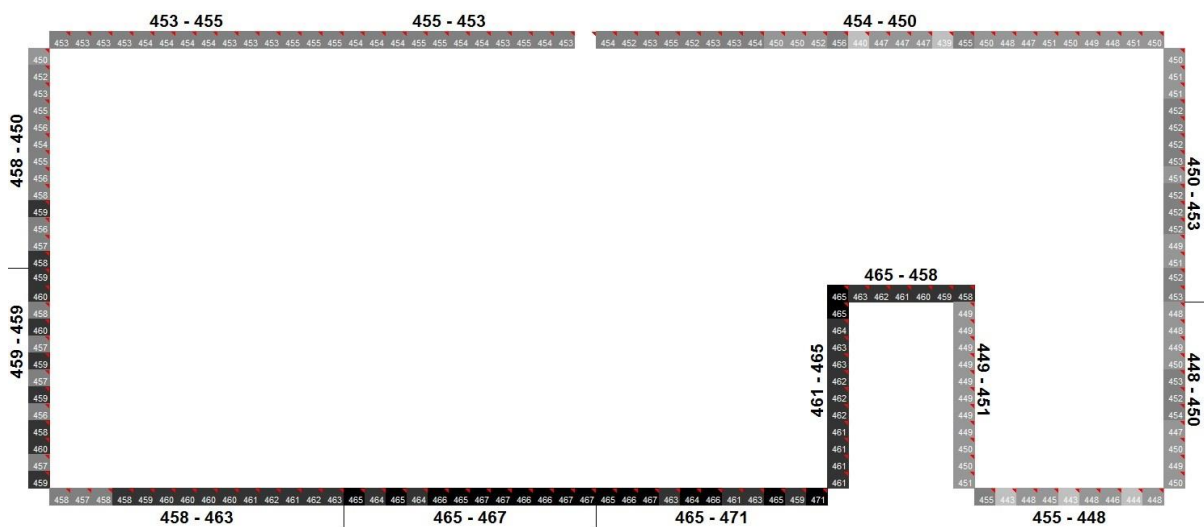
Rozkład temperatury płytek w hali z paletą pokazuje rysunek 15:



Rysunek 15: Rozkład temperatury płytek w hali przemysłowej z paletą. Wartości w K.

Na rysunku widać wyraźnie wyższą temperaturę na podłodze pod promiennikiem oraz na lewej ścianie palety. Temperatura podłogi wynika głównie z największego w tym miejscu opromieniania, co widać na Rysunku 16. Natomiast wysoka temperatura po lewej stronie palety jest spowodowana tym, że straty ciepła na tych płytkach są małe, ponieważ są skutkiem wnikania ciepła do powietrza, którego temperatura jest równa 299,5 K oraz przewodzenia przez paletę, której temperatura na drugim końcu jest podobnie wysoka i wynosi około 299,3 K. Najniższe temperatury płytek z powodu braku bezpośredniego padania promieni znajdują się w prawym dolnym rogu hali i wynoszą około 298 K.

Rysunek 16 przedstawia opromienianie w hali z paletą:



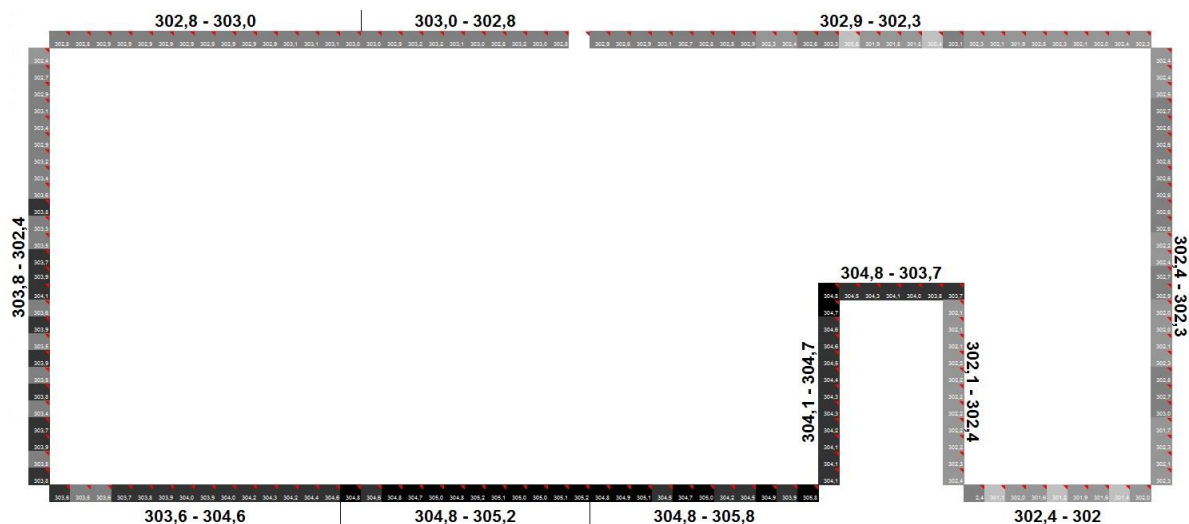
Rysunek 16: Rozkład opromieniania w hali przemysłowej z paletą. Wartości w  $W/m^2$ .

Na rozkładzie opromieniania z Rysunku 16 widać oznaczone jaśniejszym kolorem miejsca, na które rzucany jest cień przez paletę. Widać też mniejsze opromienianie na pra-



wej ścianie hali oraz na suficie. Oprócz stref zacinienia jest to spowodowane pozycją promiennika, który nie jest ustawiony na samym środku hali, lecz przesunięty jest o półtora metra w lewą stronę.

Rysunek 17 przedstawia temperaturę promieniowania w hali:

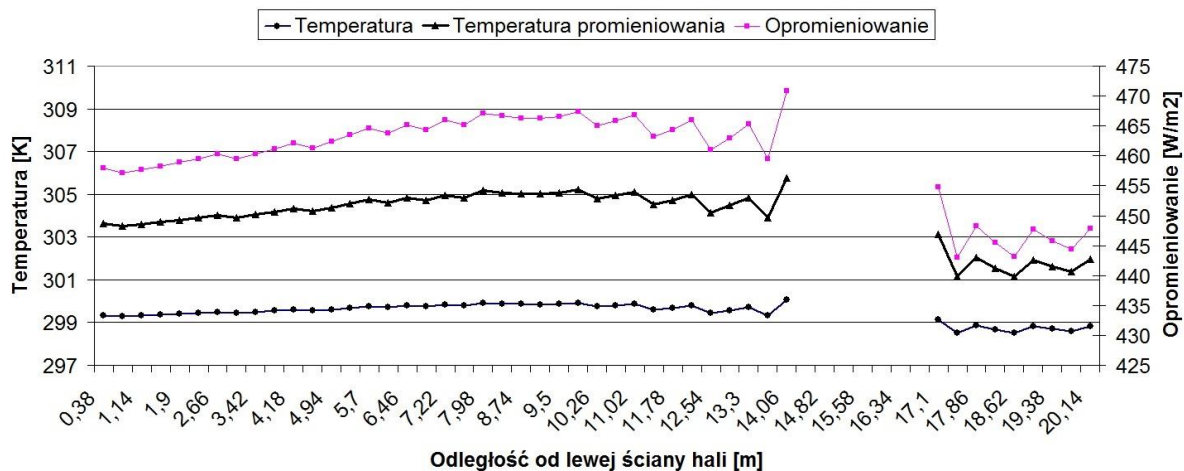


Rysunek 17: Rozkład temperatury promieniowania w hali z paletą. Wartości w K.

Temperatury promieniowania mieszczą się w granicach od 302 K w dolnym prawym rogu hali, gdzie nie dociera promieniowanie do 305,8 K w miejscu na podłodze, gdzie opromieniowanie jest największe. Są też mniej wyrównane w porównaniu do temperatur powierzchni płytek z Rysunku 15, co najlepiej widać u dołu lewej ściany hali. Wpływ na to ma brak wpływu przenikania ciepła do otoczenia jak w przypadku temperatury powierzchni elementów oraz większe znaczenie stosunków konfiguracji, które w związku ze sposobem ich wyznaczania zależnie od miejsca płytki na ścianie posiadają na przemian większy lub mniejszy błąd. Błąd ten nie jest znaczący jednak w związku z automatycznym dobieraniem kolorów widoczny w postaci raz za razem zmieniających się odcieni.

Rysunek 18 przedstawia wykres temperatur i opromieniowania na podłodze.

Wykres temperatur i opromieniowania na podłodze



Rysunek 18: Wykres rozkładu temperatury płytek, temperatury promieniowania i opromieniowania na podłodze.

Puste miejsce na wykresie z Rysunku 18, przedstawiającym rozkład temperatur i opromieniowania na podłodze hali, oznacza miejsce, w którym jest ustawiona paleta. Można zauważyć mniejszą zmienność temperatury płytek w porównaniu do temperatury promieniowania. Widać również podwyższone temperatury i opromieniowanie na podłodze blisko palety. Może to być spowodowane w niewielkim stopniu, jak wspomniano w odniesieniu do Rysunku 17, błędami przy wyznaczaniu stref zacienienia, a także sytuacją gdzie płytka na podłodze jest w szczególności dobrze opromieniowana ze ścian palety.

Trzecim zamodelowanym obiektem będzie hala z paletą o parametrach:

Wysokość hali:  $X = 10$  m

Szerokość hali:  $Y = 20$  m

Wysokość palety:  $I = 5,2$  m

Szerokość palety:  $J = 2,8$  m

Odległość lewej ściany hali do krawędzi palety:  $D = 5$  m

Odległość lewej ściany hali do krawędzi promiennika:  $L = 9,5$  m

Szerokość promiennika:  $E = 0,5$  m. Rozmiary promiennika z [9].

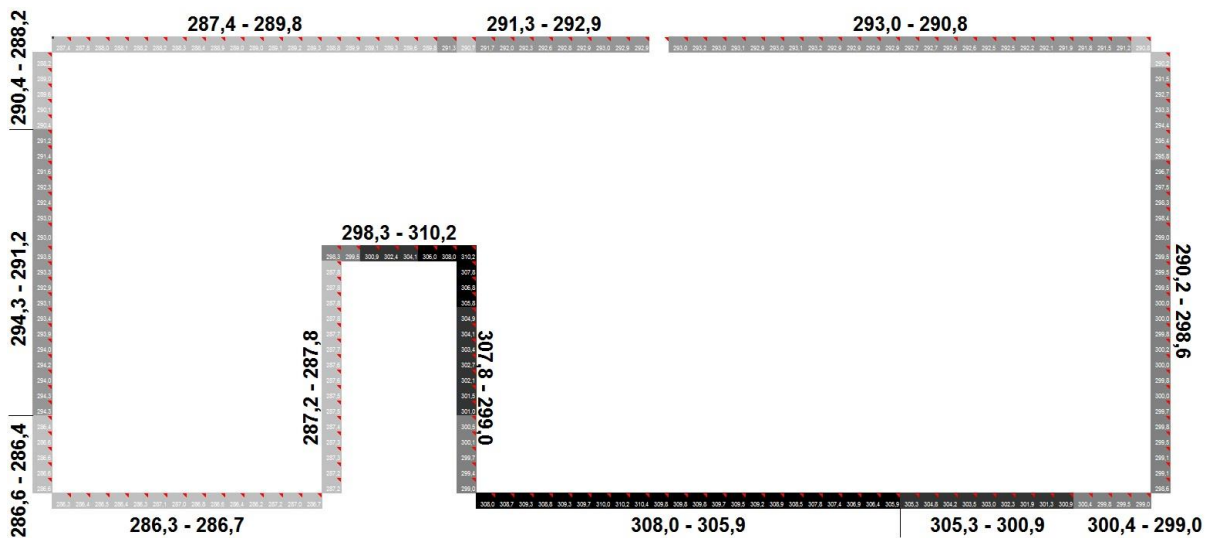
Gęstość strumienia ciepła promiennika:  $\dot{q} = 5000$  W/m<sup>2</sup>. Gęstość strumienia promiennika została wyznaczona na podstawie danych ciemnych gazowych promienników rurowych z [9]. Temperatura powietrza w hali została określona na stałym poziomie 283 K.

Oznaczenia zgodne z opisem z Rysunku 9. Wartości innych współczynników przyjęto jak na Rysunku 10. Układ został podzielony na 200 płytek o wymiarze 0,352 m każda.

Rysunek 19 przedstawia temperaturę powierzchni elementów w budynku. Widoczny jest znaczny wpływ określonej na stałym poziomie temperatury w hali. Tylko na najmniej opromieniowanych elementach w górnym i dolnym rogu lewej strony hali temperatura płytek jest niższa niż 283 K.



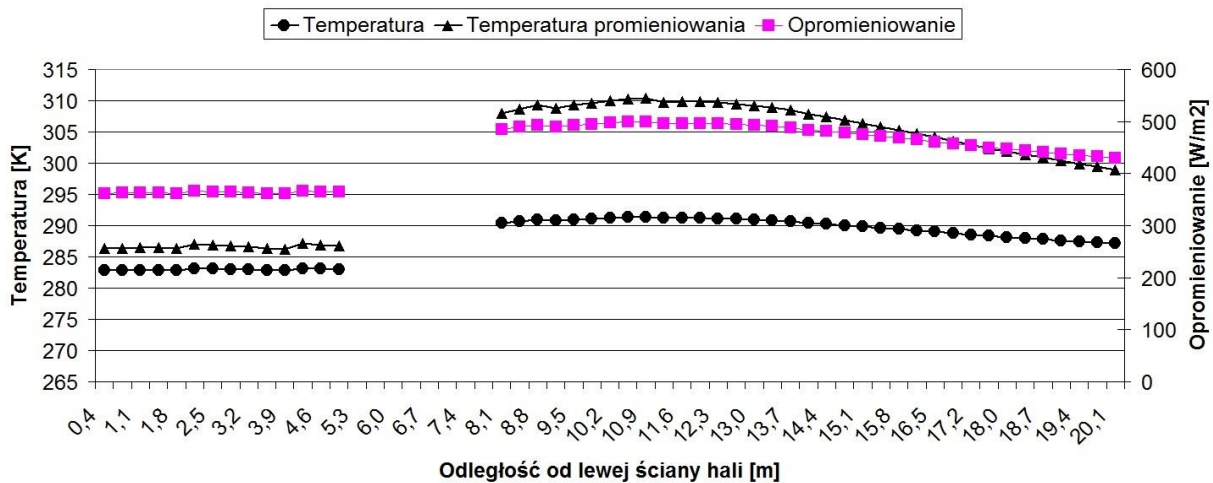




Rysunek 21: Rozkład temperatury opromieniowania z ustaloną temperaturą powietrza na poziomie 283 K. Wartości w K.

Na Rysunku 22 przedstawiony został wykres temperatury płytek, opromieniowania oraz temperatury promieniowania na podłodze. Widać dużo większy przyrost temperatury promieniowania niż temperatury powierzchni płytek porównując podłogę po lewej i prawej stronie palety.

Wykres temperatury i opromieniowania na podłodze



Rysunek 22: Wykres rozkładu temperatury płytek, temperatury promieniowania i opromieniowania na podłodze w hali ze stałą temperaturą wewnętrzną równą 283 K.

Czwartym zamodelowanym obiektem będzie hala z paletą o parametrach:

Wysokość hali:  $X = 10$  m

Szerokość hali:  $Y = 20$  m

Wysokość palety:  $I = 5,2$  m

Szerokość palety:  $J = 2,8$  m

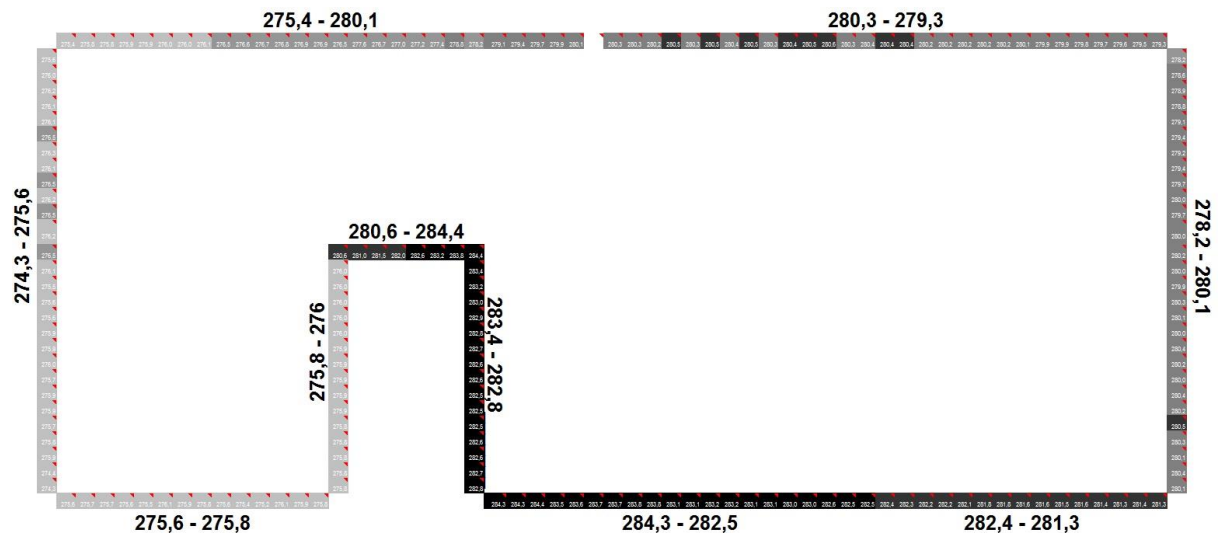
Odległość lewej ściany hali do krawędzi palety:  $D = 5$  m  
 Odległość lewej ściany hali do krawędzi promiennika:  $L = 9,5$  m  
 Szerokość promiennika:  $E = 0,5$  m. Rozmiary promiennika z [9].

Gęstość strumienia ciepła promiennika:  $\dot{q} = 1000$  W/m<sup>2</sup>. Gęstość strumienia promiennika została wyznaczona na podstawie bilansu energii dla stanu ustalonego.

Wnikanie ciepła między elementami hali a powietrzem wewnętrznym zostało pominięte, dlatego temperatura w hali nie została określona a wymiana ciepła w hali odbywa się tylko na drodze promieniowania.

Oznaczenia zgodne z opisem z Rysunku 9. Wartości innych współczynników przyjęto jak na Rysunku 10. Układ został podzielony na 200 płytek o wymiarze 0,352 m każda.

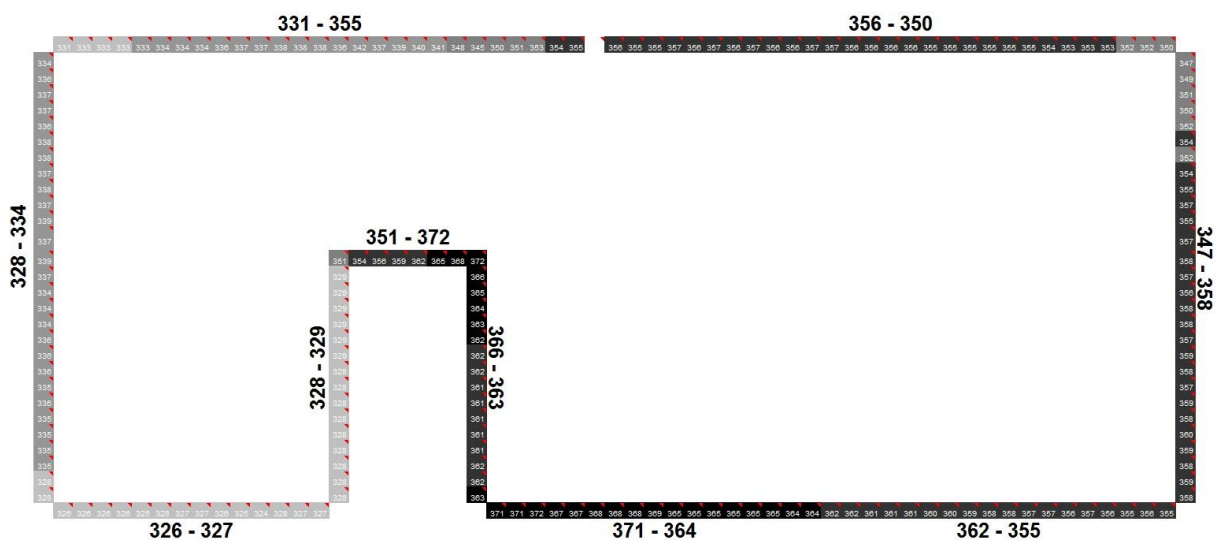
Na Rysunku 23 przedstawiono rozkład temperatury płytek w hali:



Rysunek 23: Rozkład temperatury w hali bez uwzględnienia konwekcji do powietrza wewnętrznego. Wartości w K.

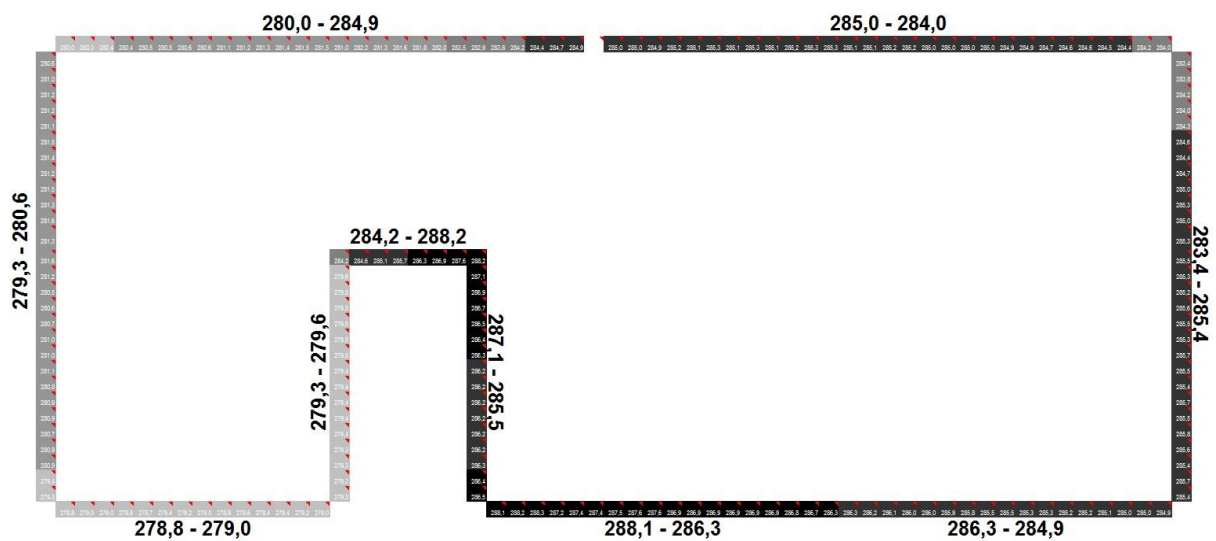
Porównując Rysunek 23 z Rysunkiem 15, który pomimo innej pozycji palety ma podobne parametry, takie jak wymiary hali oraz gęstość strumienia ciepła promiennika, można zauważyć, że temperatura płytek bezpośrednio pod promiennikiem jest niższa o około 6 K a w miejscach nieopromieniowanych różnica ta jest znacznie większa i wynosi 24 K. Świadczy to o dużym wpływie wnikania ciepła pomiędzy elementami obiektu a powietrzem wewnątrz budynku oraz temperatury powietrza w hali na ogólny rozkład temperatur.

Rozkład promieniowania został opisany na Rysunku 24. Widać na nim jak miejsce ustawienia palety wyznacza wyraźną granicę, od której na lewo opromieniowanie hali jest mniejsze. Można zauważyć, że nawet odbite promieniowanie w dużo mniejszym stopniu trafia do lewej części hali porównując z nieopromieniowanym bezpośrednio przez promiennik sufitem nad prawą częścią podłogi.



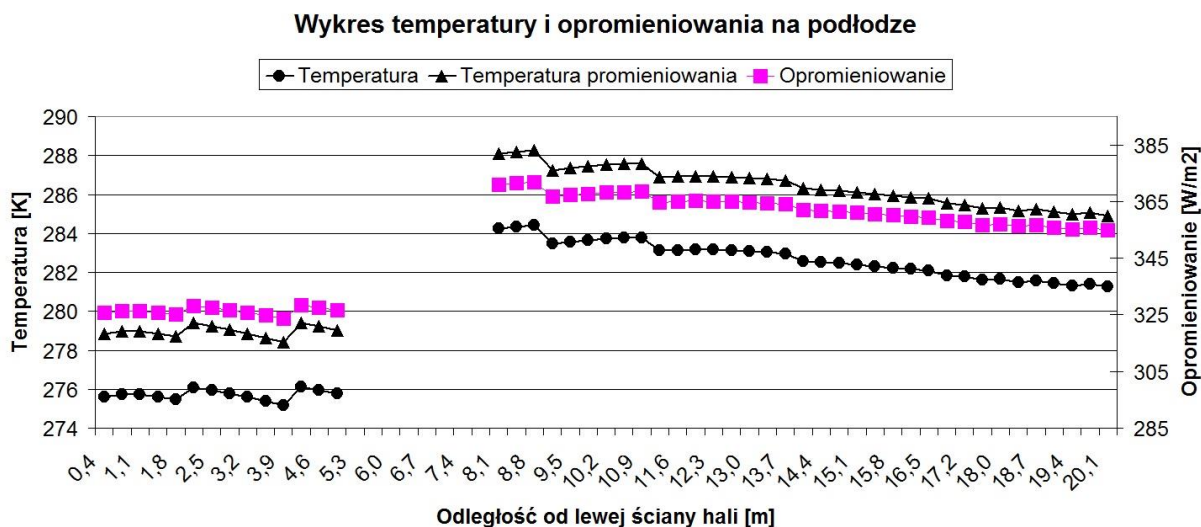
Rysunek 24: Rozkład opromieniowania w hali bez uwzględnienia konwekcji do powietrza wewnętrznego. Wartości w  $W/m^2$ .

Na Rysunku 25 widać rozkład temperatury promieniowania w hali. Największa temperatura jest osiągnięta na podłodze pod promiennikiem oraz na prawym narożniku palety. Można zauważyć, że cała hala po prawej stronie palety ma wyższe temperatury promieniowania.



Rysunek 25: Rozkład temperatury promieniowania w hali bez uwzględnienia konwekcji do powietrza wewnętrznego. Wartości w K.

Na rysunku 26 widoczny jest wykres temperatury płytek, opromieniowania i temperatury promieniowania na podłodze w hali. Widać dużo większy przyrost temperatury płytek w porównaniu do przykładów hali z uwzględnieniem wnikania ciepła do powietrza wewnętrznego.



Rysunek 26: Wykres rozkładu temperatury płytek, temperatury promieniowania i opromieniowania na podłodze bez konwekcji do wewnątrz hali.

### 3 Podsumowanie i wnioski

Wyniki uzyskane w niniejszej pracy magisterskiej potwierdzają konieczność odpowiedniej analizy promieniowania w celu najbardziej korzystnego wykorzystania energii, co widać na przykładzie promiennika ustawionego za blisko palety, który ogrzewa niepotrzebnie jej nieużywaną część. Pamiętać jednak trzeba, że algorytm bierze pod uwagę stan ustalony w hali, który w rzeczywistych warunkach nie jest osiągalny. Stan ustalony nie jest osiągalny nie tylko z powodu wpływu takich czynników jak wietrzenie hali, ale też ze sposobu wykorzystania samych promienników. W rzeczywistych warunkach wykorzystywane są zalety promienników, takie jak krótki czas reakcji, natychmiastowy miejscowy efekt grzania, co skutkuje brakiem ciągłości pracy promienników. Najważniejsza jednak dla osób w hali jest odczuwalna temperatura w miejscu pracy, na którą składa się temperatura otoczenia oraz temperatura promieniowania. Dlatego też istnieje możliwość symulacji różnych warunków. W przykładzie z ustaloną temperaturą wewnątrz hali na poziomie 283 K i gęstości strumienia ciepła odpowiadającej rzeczywistym urządzeniom, temperatura odczuwalna, jako średnia temperatury powierzchni i promieniowania wynosi około 299 K, co pozwala na komfort cieplny nawet w pracy niewymagającej ruchu.

## Literatura

- [1] B. Biernacka, Miesięcznik CIEPŁOWNICTWO, OGRZEWNICTWO, WENTYLACJA 9/2012, Badania rozkładów temperatury w gruncie na różnych głębokościach.
- [2] E. Kostowski, *Przepływ ciepła*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2006).
- [3] H. Koczyk, *Ogrzewnictwo Praktyczne. Projektowanie Montaż Eksploatacja*, Wydawnictwo Systherm Serwis, Poznań 2005
- [4] H. Recknagel, E.Sprenger, E.R. Schramek, *Kompendium wiedzy. Ogrzewnictwo, klimatyzacja, ciepła woda, chłodnictwo*, wydanie trzecie polskie, tłumaczone w oparciu o 73. wydanie niemieckie, Omni Scala, (2008).
- [5] P. O. Fanger, *Komfort cieplny*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa (1974)
- [6] Polska norma PN-EN ISO 6946.
- [7] Polska norma PN-EN 12831.
- [8] Algebra stosunków konfiguracji, strona internetowa <http://www.thermalradiation.net/sectionc/C-2a.htm> oraz <http://www.thermalradiation.net/sectionc/C-5a.html>, dostęp 25 maja 2016.
- [9] Dane techniczne promienników i materiały informacyjne, Strona internetowa firmy Schwank, <http://www.schwank.pl/pl/produkty/gama-produktow/ciemne-promienniki/calorschwank/dane-techniczne.html> oraz [http://www.schwank.pl/fileadmin/00\\_customer/pl/pdf/Podstawy\\_promienniki\\_Schwank.pdf](http://www.schwank.pl/fileadmin/00_customer/pl/pdf/Podstawy_promienniki_Schwank.pdf), dostęp 25 maja 2016r.
- [10] Dane techniczne płyt warstwowych, Strona internetowa firmy Balaxmetal, [http://www.balex.eu/architekt/pliki/katalogi/katalog\\_produkow.pdf](http://www.balex.eu/architekt/pliki/katalogi/katalog_produkow.pdf), dostęp 03.06.2016
- [11] Dane techniczne płyt warstwowych, Strona internetowa firmy Nowhal, <http://www.nowhal.pl/hale-z-plyty-warstwowej>, dostęp 03.06.2016
- [12] Konstrukcja warstw podłogi przemysłowej, Strona internetowa *Inzynier budownictwa*, [http://www.inzynierbudownictwa.pl/technika,materiały\\_i\\_tehnologie,artykul,konstrukcja\\_warstw\\_podlogi\\_przemyslowej,7309](http://www.inzynierbudownictwa.pl/technika,materiały_i_tehnologie,artykul,konstrukcja_warstw_podlogi_przemyslowej,7309)

# **Analysis and identification of radiation heat transfer in the industrial hall**

Adrian Orłowski

**Key words:** radiation, radiant heater, industrial hall, heating

## **Abstract**

The aim of this paper is the analysis and identification of radiation heat transfer in the industrial hall, creating algorithm and implementation this code in the MS VBA programming language. The paper describes two dimensional model of the industrial hall with shading zones. It allows to place a rectangular object in the industrial hall, in such places in most cases it is a standard europalette with different kinds of material. This configuration can be heated by one or two infrared heater. Because of the consideration of the two dimensional configuration this calculation program referred to gas fired radiant tube heater. This paper show analysis of various calculation. Settings allow to change many calculation options and set technical specifications of modeling building for example thermal conductivity coefficient, surface film conductance, emissivity and more for each parts of hall. In this paper there are also included currently valid building standards concerning thermal insulation in Poland.

