

Wnioski

W rozdziale przedyskutowano możliwości rozwiązania najbardziej palącej kwestii utrudniającej efektywne zastosowanie symulacji zachowania budynku w procesie projektowania. Jak pokazano schematycznie na rysunku 7.6, jednym z głównych celów jest zwiększenie zainteresowania symulacjami poprzez prawidłowe i sensowne aplikacje praktyczne. W odniesieniu do nowych metod (takich jak CFD) należy unikać nadmiernego hałasu wokół nich oraz efektu pozbywania się złudzeń, poprzez realistyczne podejście, uwzględniające zarówno możliwości nowych metod jak i ich ograniczenia.

W kontekście symulacji przepływów powietrza w budynku celowe jest przestrzeganie 10 zasad Banksa i Gibsona (1997) sugerujących kiedy nie wykonywać symulacji:

1. Problem może być rozwiązany za pomocą "zwykłej analizy".
2. Problem może być rozwiązany analitycznie.
3. Łatwiej można przeprowadzić bezpośredni eksperyment.
4. Koszt symulacji przewyższa możliwe oszczędności.
5. Nie ma odpowiednich środków dla realizacji projektu.
6. Brak czasu na wykorzystanie wyników modelowania.
7. Brak jakichkolwiek danych – nawet oszacowań.
8. Model nie może być zweryfikowany.
9. Nie można osiągnąć wymagań stawianych projektowi.
10. Zachowanie systemu jest zbyt złożone lub nie może być zdefiniowane.

7.2. WYKORZYSTANIE SYMULACJI KOMPUTEROWEJ DO OCENY NISKOENERGETYCZNYCH SYSTEMÓW CHŁODZENIA W CZECHACH*

W krajach europejskich zużycie energii w budynkach stanowi ok.40-50% całkowitej krajowej konsumpcji energii pierwotnej. Zużycie energii na chłodzenie stanowi natomiast ok. 10% całkowitego zużycia energii budynków biurowych. Procent pomieszczeń biurowych z pełną klimatyzacją rośnie w krajach europejskich, zwłaszcza w Czechach, gdzie pełna klimatyzacja jest aktualnym standardem w nowobudowanych i modernizowanych budynkach biurowych. Rozwój informacji technologicznej prowadzi do wzrostu wymagań dla systemów chłodzenia w budynkach. Tak więc, chłodzenie liczy się w całkowitym zużyciu energii w budynkach, a także wpływa na emisję gazów do środowiska ponieważ systemy chłodzące są zwykle zasilane energią elektryczną, która w Czechach wytwarzana jest głównie z węgla (Santamouris 1996, Heap 2001).

Wiele budynków jest wciąż budowanych lub modernizowanych bez uwzględnienia możliwości oszczędzania energii. Ma to poważny wpływ na wzrost zużycia energii i poziom komfortu. Aby zmniejszyć zużycie ciepła i zwiększyć poziom komfortu, przy optymalizacji, budynki należy traktować całość, a nie jako sumę oddzielnych zoptymalizowanych elementów.

*autorzy: Miloš Lain¹, Martin Barták¹, František Drkal¹, Jan Hensen²

¹Department of Environmental Engineering, Czech Technical University in Prague

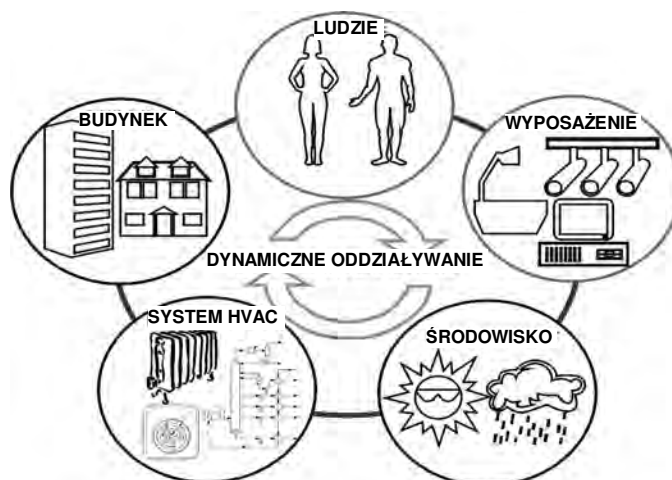
²Center for Buildings & Systems TNO – TU/e, Technische Universiteit Eindhoven

tytuł oryginału: *Use of computer simulation for the evaluation of low energy cooling in the Czech Republic*,

tłumaczenie: Joanna Ferdyn-Grygierek

redakcja: Andrzej Baranowski

W takim przypadku idealna jest symulacja ponieważ nie jest ograniczona jedynie do konstrukcji samego budynku ale obejmuje również środowisko wewnętrzne, z równoczesnym uwzględnieniem środowiska zewnętrznego, mechaniczne, elektryczne lub strukturalne systemy oraz tradycyjne i odnawialne systemy dostarczania energii. Przez ocenę wyposażenia budynku oraz idei zintegrowanych systemów symulacja może być pomocna w projektowaniu i analizie budynku dla osiągnięcia w sposób zrównoważony dobrego środowiska wewnętrznego.



Rys. 7.7.

Budynek jako zintegrowany system energetyczny

Wykorzystanie modelowania komputerowego i symulacji do projektowaniu i/lub oceny budynków oraz systemów HVAC umożliwia szybkie przejście od badań do codziennej praktyki inżynierskiej.

W przeciwieństwie do uproszczonych metod obliczeniowych (nie rozpatrujących systemów dynamicznych), komputerowe modelowanie staje się coraz powszechniejsze. Symulacja komputerowa wymaga większej ilości informacji wejściowych i przetwarzanych danych niż zwykła praca projektowa. Z drugiej strony pozwala na szybkie i szczegółowe analizy różnych rozwiązań zarówno geometrii i konstrukcji budynku, jak i projektowania i sterowania systemów HVAC.

Celem modelowania komputerowego jest optymalizacja budynku i jego systemu obsługi, zgodnie z wymaganiami dotyczącymi jakości powietrza wewnętrznego przy utrzymaniu minimalnego zużycia energii.

Zaprezentowane wyniki analiz przedstawiają zarówno aktualny poziom wiedzy w Czechach, jak i różne opcje oszczędzania energii, zwłaszcza w niskoenergetycznych systemach chłodzenia.

Niskoenergetyczne i pasywne systemy chłodzenia

Niskoenergetyczne systemy chłodzenia dostarczając chłód w efektywny sposób, pozwalają na redukcję zużycia energii, a także zmniejszają szczytowe zapotrzebowanie na energię elektryczną. Systemy te wykorzystują tanie źródła chłodu; np. jest to wykorzystanie powietrza otaczającego, czy też wykorzystanie temperatury gruntu lub zastosowanie wyższej temperatury wody chłodniczej. Takie technologie mogą być brane pod uwagę przy pasywnych lub hybrydowych systemach chłodzenia (termin pasywne chłodzenie nie powinien być mylony z projektowaniem pasywnie chłodzonego budynku).

Niskoenergetyczne systemy chłodzenia można podzielić na dwie grupy: te obejmujące główne źródła chłodu i te nastawione wyłącznie na dostawę chłodu na dany obszar. (IEA 1995, Liddament 2000).

Pierwsza grupa systemów opiera się na naturalnych źródłach chłodu, ale większość z nich wymaga wentylatorów lub pomp. Przykładami takich systemów są:

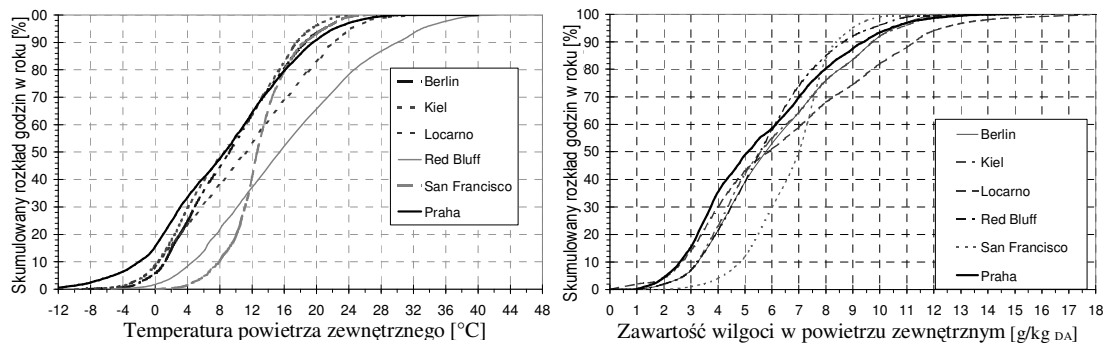
- wentylacja nocna,
- chłodzenie wyparne,
- chłodzenie gruntowe.

Druga grupa technologii nastawiona jest na dostarczanie chłodu w zadane miejsce w efektywny sposób; te systemy zwykle pracują dobrze z wykorzystaniem źródeł chłodu o niższej temperaturze.

Klimat w Czechach

Czechy są krajem śródlądowym zlokalizowanym w środkowej Europie. Stolicą i zarazem największym miastem jest Praga. Zlokalizowanych jest tu większość państwowych i prywatnych biur. Klimat czeski można opisać jako ciepły (maksymalna temperatura w lecie wynosi 32 °C) i umiarkowanie wilgotny (normowa zawartość wilgoci wynosi w lecie 10 g/kg).

Porównanie klimatu Pragi do innych miast, w których stosowane są niskoenergetyczne systemy chłodzenia, pokazuje, że letni klimat Pragi jest bardzo podobny na przykład do klimatu Berlina (rys. 7.8). a więc rezultaty badań okresu letniego dla Berlina mogą być wykorzystane do wstępnych badań dla Pragi.



Rys. 7.8.

Porównanie skumulowanego rozkładu temperatury (po lewej) i zawartości wilgoci (po prawej) dla Pragi i pięciu innych miast (Bene 1997)

Dla oceny systemów chłodzenia wyparnego, entalpio-godziny są definiowane przy uwzględnieniu wilgotności powietrza (IEA 1995). Stopniogodziny chłodzenia (CDH) i entalpio-godziny (CDH) obliczono dwa razy, z uwzględnieniem dwóch różnych temperatur referencyjnych, mianowicie 18 °C (indeks 18) i 25 °C (indeks 25). Referencyjna wilgotność względna dla obliczanych godzin entalpii wynosiła 40 %. W tabeli 7.4 przedstawiono godziny entalpii i stopniogodziny chłodzenia dla Pragi oraz dla kilku innych miast.

Budynki historyczne wybudowane do lat '50 charakteryzuje masywna konstrukcja (cegła, beton), a pole powierzchni okien sięga 30 % powierzchni elewacji. Budynki te nie są zwykle ani klimatyzowane, ani mechanicznie wentylowane. Modernizacja takich budynków jest zazwyczaj traktowana indywidualnie. Większość ciężkich historycznych budynków może być obsługiwana bez klimatyzacji. Duża pojemność cieplna pomaga

utrzymać komfort cieplny tak długo, jak reguły pasywnego chłodzenia (niskie zyski wewnętrzne, zacienienie) są stosowane podczas modernizacji. Pojemność cieplna budynku może gwarantować wymagany komfort.

Tab. 7.4. Stopniogodziny chłodzenia i entalpio-godziny

Miasto	CDH ₂₅	EH _{25/40} (kJ/kg _{DA})	CDH ₁₈	EH _{18/40} (kJ/kg _{DA})
Praga	361	3 047	4 581	25 198
Drezno	527	3 040	5 154	28 068
Sztokholm	150	1 350	1 000	16 425
Zurich	426	1 658	4 757	16 380
Nowy Jork	2 570	25 698	15 942	68 783
Toronto	837	12 294	7 643	40 831

Galeria sztuki w Sovovych Młynach

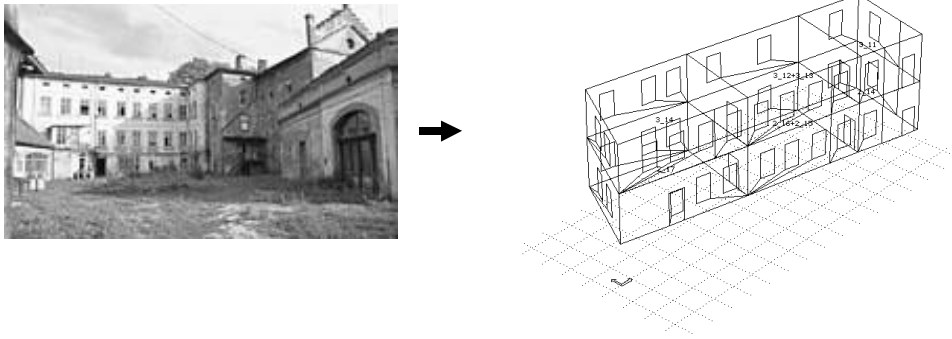
Jedną z głównych wad tradycyjnego inżynierskiego projektowania systemów HVAC jest niedocenianie wpływu akumulacji ciepła w budynku. Ani okresowe zmiany temperatury powietrza zewnętrznego, ani wpływ struktury budynku nie mogą być w pełni rozważane w tradycyjnym podejściu. Powoduje to częste przewymiarowywanie urządzeń w systemach ogrzewania i chłodzenia, szczególnie w przypadku budynków historycznych zwykle o bardzo ciężkiej konstrukcji.

W procesie wspomagania projektowania nowej galerii sztuki ulokowanej w historycznym budynku Sovovych Młynów w Pradze, do określenia wymaganej ilości chłodu do klimatyzacji wykorzystano symulację komputerową. Wykorzystując standardowe metody obliczeniowe oszacowano wydajność chłodniczą wynoszącą 100 kW. Na taką wartość dobrano urządzenia chłodzące oraz zaprojektowano kanały wentylacyjne. Dozwolone były tylko minimalne zmiany w konstrukcji budynku i wygładzie wnętrza; np. nie zezwolono na rozległe przewody.

W przyszłości galeria sztuki będzie znajdować się na pierwszej i drugiej kondygnacji w północnym skrzydle budynku. Ta część oparta jest na ciężkich murowanych ścianach zewnętrznych (80 cm grubości), a okna wyposażone są w wewnętrzne drewniane okiennice, a zatem wnętrze jest dobrze chronione od zysków od promieniowania słonecznego a konstrukcja budynku jest zdolna do znaczącej akumulacji ciepła.

Wygenerowano model 3D, składający się z sześciu stref i reprezentujący omawianą część budynku (rys. 7.9).

Obliczenia, w warunkach dynamicznych, przeprowadzono przy użyciu programu symulacyjnego ESP-r. Uwzględniono konstrukcję budynku, zacienienie przez sąsiadujące budynki, zmienność zysków wewnętrznych (zyski od ludzi i oświetlenia) i ekstremalne letnie warunki w Pradze reprezentowane przez jeden tydzień rzeczywistych danych pogodowych z sierpnia 1997 r. Model był kalibrowany w oparciu o temperaturę powietrza zmierzoną w istniejącym budynku.

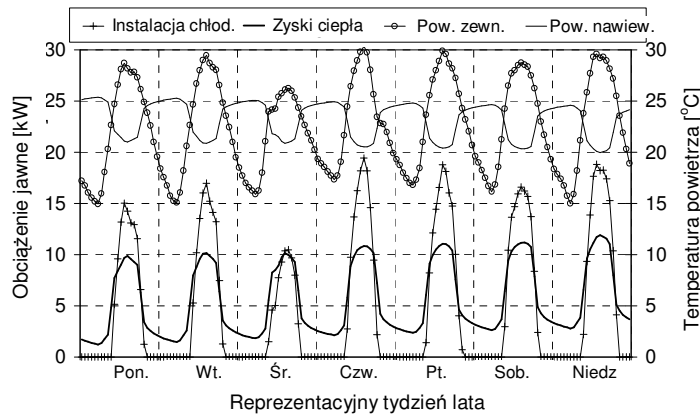


Rys. 7.9.

Zewnętrzny widok budynku i model (z programu ESP-r)

Wewnętrzne środowisko termiczne było analizowane dla przypadku kiedy budynek jest wentylowany powietrzem zewnętrznym z opcją chłodzenia. Wyniki pokazały znaczący wpływ wewnętrznych zysków ciepła od ludzi i oświetlenia. Klimatyzacja okazała się konieczna, a całkowita wydajność chłodnicza wynosząca tylko 25 kW pokrywa zarówno zyski od słońca, jak i wewnętrzne zyski ciepła przy temperaturze powietrza wewnętrznego 26 °C lub niższej. Całkowita wymiana powietrza nie przekroczyła 6000 m³/h i pozwoliła na zmniejszenie przewodów wentylacyjnych

Na rysunku 7.10 przedstawiono zoptymalizowany tryb pracy systemu klimatyzacji.



Rys. 7.10.

Zoptymalizowane sterowanie systemem klimatyzacji (nastawa temp. 26°C)

Galeria jest wentylowana w sposób ciągły powietrzem zewnętrznym; urządzenia chłodnicze działają jedynie wtedy gdy temperatura powietrza zewnętrznego przewyższa wymaganą temperaturę nawiewu (obliczona w oparciu o całkowite zyski ciepła w galerii).

Badania pomogły nie tylko znacząco zmniejszyć koszty inwestycyjne, ale także zminimalizować zmiany w konstrukcji i wystroju wnętrza w cennym budynku historycznym.

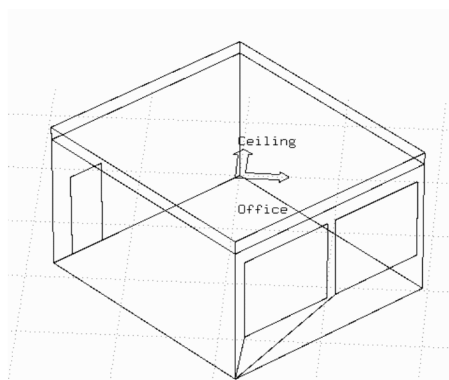
Modernizacja budynków biurowych wybudowanych w latach 1950-1980

Te budynki wybudowano w okresie socjalizmu w związku z czym typowa dla nich jest ciężka żelbetowa obudowa, kondygnacje wykonane są z prefabrykowanych elementów, bez klimatyzacji ani wentylacji mechanicznej.

Do tej kategorii należy bardzo duży procent czeskich budynków biurowych. Modernizacja tego typu budynków jest aktualnym problemem. Jest to temat obszernych badań z wykorzystaniem symulacji komputerowej (Lain 2004). W badaniach tych oceniane jest zastosowanie wentylacji nocnej i stropów chłodzących.

Opis modelu

Symulacje wykonano dla typowego pomieszczenia biurowego o wymiarach 4,92 x 5,5 x 3,2 m. W pomieszczeniu znajdują się dwa okna o orientacji południowo-wschodniej i obejmują 55% ściany zewnętrznej. Model pomieszczenia przedstawiono na rysunku 7.11.



Rys. 7.11.

Model biura w programie ESP-r

Model składa się z dwóch stref (o jednorodnej temperaturze powietrza) reprezentujących „strefę biura” i „chłodzącą strefę sufitu”. W modelu uwzględniono wewnętrzne zyski ciepła od ludzi (3 x 62 W), komputerów (3 x 40 W) i monitorów (3 x 58 W).

Symulacje i wyniki

Analizowano dwie metody pasywnego chłodzenia polepszające komfort cieplny w lecie w nieklimatyzowanym biurze: zmniejszenie zysków ciepła od słońca przez stosowanie zasłon lub odbicie promieniowania oraz wentylację naturalną. Symulacje wykonano dla trzech sposobów wentylacji:

V1 tylko infiltracja – wymiana powietrza 0,5 h-1; 24 godziny na dobę,

V2 wentylacja nocna – wymiana powietrza 5 h-1; od 18:00 do 7:00,

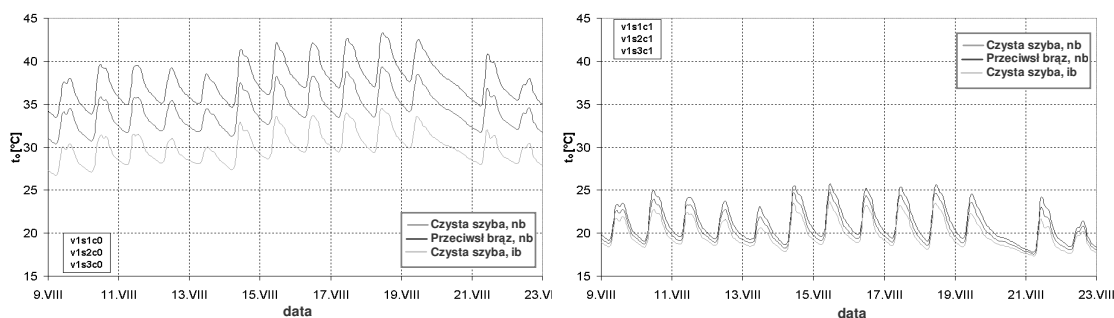
V3 dzienna wentylacja – wymiana powietrza 10 h-1; od 7:00 do 18:00,

Symulowano trzy rodzaje oszklenia okien:

S1 Standardowe podwójne oszklenie o współczynniku przepuszczalności promieniowania słonecznego 0,71,

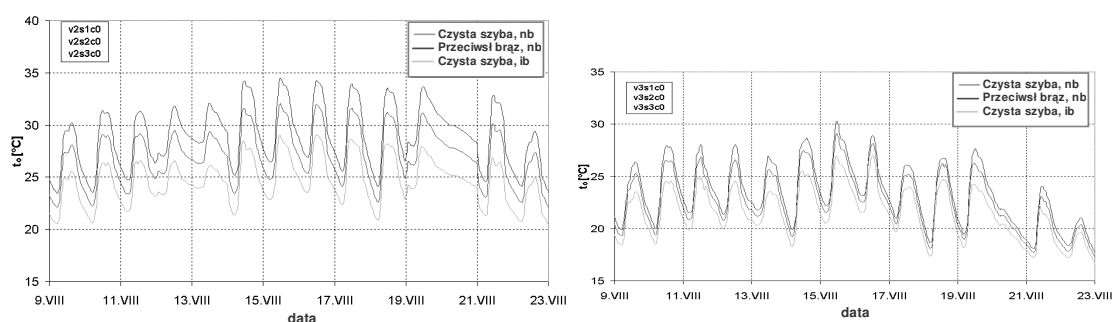
S2 Przeciwsłoneczne brązowe oszklenie o współczynniku przepuszczalności promieniowania słonecznego 0,48,

S3 Oszklenie z wewnętrzną zasłoną o współczynniku przepuszczalności promieniowania słonecznego 0,2.



Rys. 7.12.

Temperatura operacyjna dla dwóch tygodni lata dla wariantu tylko z infiltracją, przy różnych typach oszklenia, bez (po lewej) oraz z sufitem chłodzącym



Rys. 7.13.

Temperatura operacyjna dla dwóch tygodni lata dla wariantu z nocną wentylacją oraz z dzienną wentylacją (po prawej) przy różnych typach oszklenia, bez sufitu chłodzącego

Wszystkie warianty symulowano z chłodzeniem (C0) i bez chłodzenia (C1). Temperatura chodzenia ustawiona była na 17°C przez 24 godziny na dobę, 7 dni w tygodniu. Dało to 18 kombinacji obliczeń. Symulacje były wykonywane dla trzech letnich miesięcy z wykorzystaniem klimatu referencyjnego dla Pragi (dane godzinowe). Przykładowe wyniki dla wybranych dwóch tygodni przedstawiono na rysunkach 7.12 i 7.13. Wyniki dla 3 miesięcy zestawiono w tabeli 7.5.

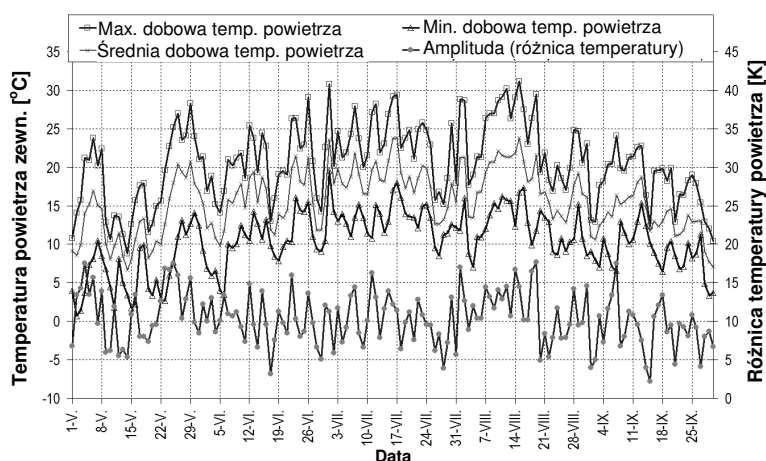
Tab. 7.5. Liczba godzin pracy dla trzech miesięcy lata przy określonym przedziale temperatur operacyjnych

Temperatura operacyjna	od	18	24	28	32	
	do	18	24	28	32	
Wentylacja	Oszklenie	Bez sufitu chłodzącego				
Infiltracja	Std.	0	0	0	143	583
Infiltracja	Przeciwni.	0	0	74	346	306
Infiltracja	Zasłony	0	48	370	271	37
Nocna went.	Std.	0	104	367	218	37
Nocna went.	Przeciwni.	0	270	337	119	0
Nocna went.	Zasłony	5	487	218	16	0
Dzien. went.	Std.	133	415	172	6	0
Dzien. went.	Przeciwni.	165	434	126	1	0
Dzien. went.	Zasłony	227	464	35	0	0

Wyniki symulacji wykazały, że wszystkie trzy niskoenergetyczne strategie chłodzenia pomagają w polepszaniu komfortu cieplnego w pomieszczeniu biurowym. Zaleca się stosowanie okien z szybami przeciwsłonecznymi i z zasłonami, zwłaszcza jeżeli w pomieszczeniu nie ma systemu chłodzenia. Temperatura operacyjna spadła o blisko 10 K kiedy stosowano infiltrację (rys. 7.12, po lewej) i o blisko 5 K przy wentylacji nocnej (rys. 7.13, po lewej). Wentylacja naturalna ma jeszcze większy wpływ na temperaturę wewnętrzną. Jest to spowodowane faktem, iż do symulacji założono bardzo dużą wymianę powietrza. W rzeczywistości trudno jest osiągnąć takie wartości oraz pojawiają się problemy związane z tak intensywną wentylacją naturalną (bezpieczeństwo, przeciąg, itp.). Chłodzenie sufitowe zaaprobowano jako system, który jako jedyny w pełni gwarantuje komfort cieplny w biurze. Efekt stropu chłodzącego był dużo silniejszy niż inne rozpatrywane technologie. Wyniki symulacji pokazały nawet chwilowe przechładzanie pomieszczenia. Zagadnienia optymalnej temperatury chłodzenia (wody chłodzącej) i sterowanie systemem będzie analizowane w przyszłości.

Wentylacja nocna

W Czechach są duże możliwości dla wentylacji nocnej. Tak jak pokazano na rysunku 7.14, różnica między maksymalną temperaturą w ciągu dnia i minimalną temperaturą w nocy jest zwykle większa niż 10 K, (średnia dzienna temperatura waha się w przedziale 11,6 K). Także minimalna temperatura powietrza w nocy wynosi mniej niż 18°C.



Rys. 7.14.

Zmienność temperatury powietrza w Pradze w sezonie chłodniczym

W Czechach nie tylko nocna wentylacja, ale także wentylacja dzienna może być wykorzystana dla celów chłodzenia. Podczas 93 % sezonu chłodniczego temperatura powietrza zewnętrznego wynosi mniej niż 24 °C, co stanowi 94 % czasu pracy.

Budynek biurowy z chłodzeniem szczytowym

Ten przypadek przeanalizowano z użyciem komputerowej symulacji zarówno przy projektowaniu nowego budynku i jego systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC) oraz przy optymalizacji sterowania systemem HVAC już podczas pracy w zrealizowanym budynku.

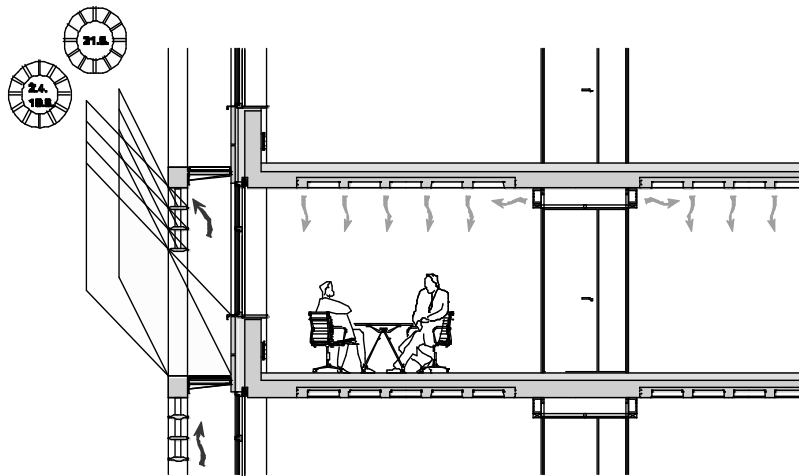
We wczesnej fazie projektowania nowych komercyjnych budynków w Pradze, wykonywano symulacje komputerowe dla sprawdzenia efektów wentylacji z nocnym

chłodzeniem. Przewidywano jakość środowiska wewnętrznego i zużycie energii dla różnych wydajności chłodniczych i różnej wymiany powietrza w projektowanym systemie HVAC, który obejmował dzienne szczytowe chłodzenie i nocną wentylację z wykorzystaniem powietrza zewnętrznego w połączeniu z akumulacją chłodu w konstrukcji budynku.

Po wykonaniu budynku, zebraniu skarg i reklamacji użytkowników i przeprowadzeniu pomiarów ustalono niektóre problemy związane z systemem HVAC, które zostały następnie rozwiązane. W celu optymalizacji strategii sterowania systemem szczytowego chłodzenia przeprowadzono długoterminowy monitoring oraz symulacje komputerowe.

Nowa siedziba Czeskiego Zakładu Energetycznego CEZ (jeden z dziesięciu największych europejskich przedsiębiorstw energetycznych i najsilniejsza biznesowa jednostka na czeskim rynku energii elektrycznej) w Pradze jest pierwszym obiektem w Czechach stosującym nocne chłodzenie i chłodzenie szczytowe w prawie całej przestrzeni biurowej. Budynek użytkowany jest od kwietnia 2002 i został zwycięzcą konkursu „Czeski budynek roku 2002” przeprowadzonego przez czeski fundusz ABF (Dvorak 2002).

Budynek podzielony jest na trzy części. Ma dwa skrzydła (sześć kondygnacji powyżej gruntu, 600 m² każda) z otwartymi biurami, wszystkie z systemem szczytowego chłodzenia i wentylacją nocną. W centralnej części budynku na parterze mieści się recepcja i indywidualnie klimatyzowane biura na wyższych kondygnacjach. Dla nocnego chłodzenia, pojemność cieplna budynku jest bardzo ważna. Budynek cechują odkryte betonowe stropy z żebrami, betonowe podłogi bez żadnych dywanów. Ponad 50 % powierzchni zewnętrznej budynku jest przezroczysta. Wszystkie południowe okna są latem całkowicie zasłonięte zewnętrznymi elementami (rys. 7.15).



Rys. 7.15.

Zasada przystaniania okien i zasada działania wentylacji nocnej

System centralnego dostarczania powietrza dla dwóch skrzydeł jest kontrolowany temperaturą powietrza powrotnego. Jest to system szczytowego chłodzenia, a jego wydajność jest mniejsza od wartości obliczeniowej. Wydajność chłodniczą wyznaczono w oparciu o symulacje we wczesnej fazie projektowania. System nie posiada żadnego indywidualnego sterowania, ani w pomieszczeniach, ani na poszczególnych kondygnacjach. System pracuje 24 godziny na dobę i utrzymuje stałą temperaturę powietrza 24 °C. Dozwolona odchyłka w normalnych warunkach to 2 K, natomiast w ekstremalnych warunkach letnich 4 K.

Symulacje we wczesnej fazie projektowania

W fazie wczesnego projektowania budynku symulacje komputerowe były wykonywane po to, aby sprawdzić koncepcję systemu wentylacji z nocnym chłodzeniem i przeanalizować dodatkowe związane z tym efekty. W programie ESP-r zamodelowano fragment (2,5x15, 5x2,7 m) otwartej powierzchni biurowej. Symulacje wykonano dwuetapowo. Celem pierwszego kroku było sprawdzenie, czy nocna wentylacja bez mechanicznego chłodzenia będzie w stanie zagwarantować komfort cieplny. Jeżeli nie, w następnym kroku ustalono wysokość niezbędnej wydajności chłodniczej z uwzględnieniem pojemności ciepłej budynku oraz efektów nocnej wentylacji.

Analizy pokazują, że jeżeli nie stosowano mechanicznego chłodzenia, temperatura powietrza wewnętrznego bardzo często (202 godziny) przekraczała limity komfortu cieplnego. Wyniki symulacji, na tym etapie, wykazały, że aby zagwarantować akceptowalny komfort cieplny, wydajność mechanicznego chłodzenia powinna wynosić 0,9 kW (23 W/m²). Symulacje w początkowym etapie projektowania sugerują, że duża pojemność cieplna i wentylacja nocna zmniejszają zużycie energii (chłodu). Jednak, aby utrzymać zadowalający komfort cieplny potrzebne jest dodatkowe chłodzenie. Dlatego zastosowano dodatkowo tzw. system „szczytowego chłodzenia”.

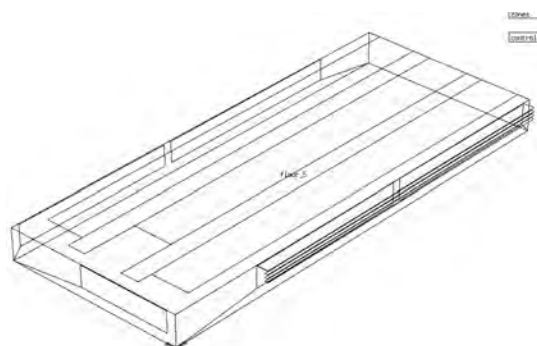
Monitoring budynku

W pierwszym roku użytkownicy otwartych biur składali wiele skarg; głównie dotyczących zbyt wysokiej temperatury powietrza wewnętrznego podczas gorących okresów w maju 2002 r. W związku z czym wykonano pomiary i przeanalizowano działanie systemu. Ostatecznie stwierdzono, że powodem nie był źle zaprojektowany system HVAC, a jego realizacja. System nie był testowany w trybie chłodzenia podczas rozruchu i niektóre urządzenia nie działały właściwie. Zawór wymiennika ciepła był nieszczelny, a zatem cały czas efektywnie działało ogrzewanie. Wentylatory pracowały na połowie wydajności ponieważ skarżono się na hałas w niektórych biurach. Nocna wentylacja nie była używana w ogóle. Kiedy główne problemy zostały zdefiniowane i ustalono warunki pracy nocnego chłodzenia, późniejszy monitoring udowodnił, że system pracuje zadowalająco.

Kalibracja modelu symulacyjnego

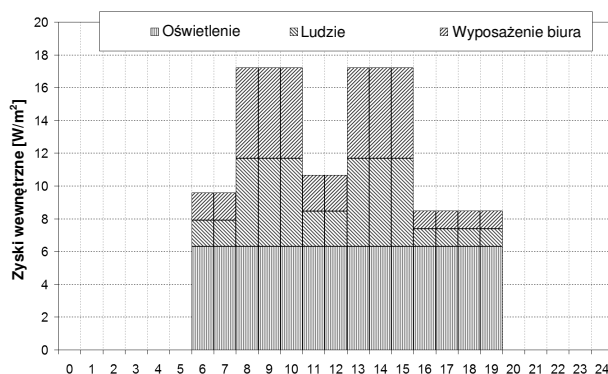
Drugim etapem badań było wykonanie bardziej złożonego modelu do optymalizacji systemu. Do kalibracji modelu wykorzystano trzy rodzaje dostępnych danych pomiarowych. Pierwsze dane to energetyczne koszty systemu. Kolejne to dane uzyskane z długoterminowego monitoringu temperatury powietrza wewnętrznego i wilgotności i z krótkoterminowych szczegółowych pomiarów temperatury powietrza i rozkładu prędkości w okolicach nawiewników. Po trzecie dane pogodowe z meteorologicznego laboratorium CTU.

W programie ESP-r zamodelowano jako jedną strefę piąte piętro skrzydła C (37,9 x 15,7 x 2,7 m). Model obejmował szczegóły konstrukcyjne, właściwości zasłon i wewnętrzne zyski ciepła. Otwarty strop i niezabezpieczona podłoga jest z betonu. Elewacja jest docieplona zgodnie z czeską normą ($U=0,36$ W/m²K), okno podwójne ($U = 1,3$ W/m²K; $g=0,5$). (rys.7.16).



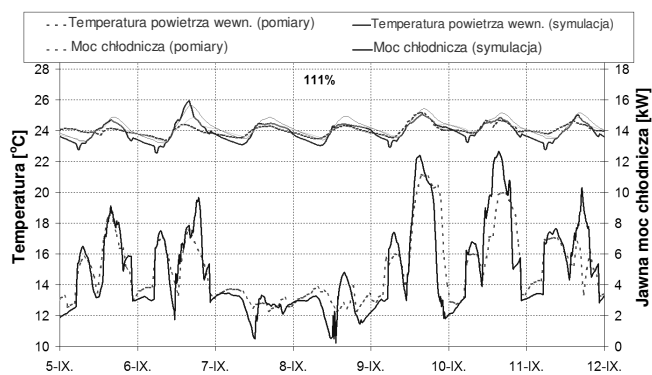
Rys. 7.16.
Model 5. piętra budynku

Rezultatem kalibracji modelu budynku, opartej na danych pomiarowych jest profil zysków wewnętrznych w ciągu dnia (rys. 7.17). Rzeczywiste zyski od wyposażenia stanowią 34 % nominalnej wartości.



Rys. 7.17.
Profil zysków wewnętrznych dla 1 dnia

Następnie model budynku został rozszerzony o model instalacji. Model ten obejmował przewody, urządzenie odzysku ciepła, wentylator i chłodnicę. Model instalacji został również wykalibrowany. Rezultaty kalibracji (rys. 7.18) pokazują podobny do wyników pomiarów przebieg temperatury powietrza wewnętrznego i przepływ chłodu do strefy.



Rys. 7.18.
Budynek z systemem urządzeń; rezultaty kalibracji modelu

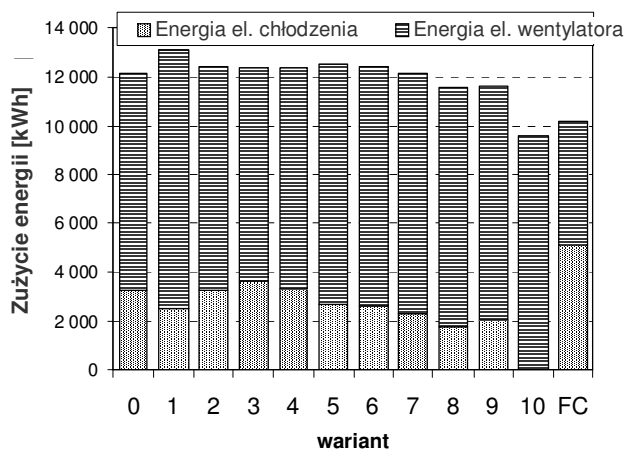
Kiedy porównujemy rezultaty symulacji z pomiarami w rzeczywistym budynku nie powinniśmy oczekiwać doskonałego dopasowania. Przy symulacji występuje zbyt dużo niepewnych parametrów (np. właściwości materiałów) i nieznanymi zmiennymi ponieważ nie były one monitorowane (np. otwieranie okien). Również rzeczywisty system czujników nie był bardzo dokładny. Dodatkowo w rzeczywistości, biuro nie jest dobrze wymieszaną strefą; w różnych punktach pomieszczenia mogą wystąpić różnice temperatury powietrza sięgające nawet 1,5 K.

Modelowanie strategii sterowania

W celu znalezienia planu sterowania, dającego najmniejsze całkowite zużycie energii, w wykalibrowanym modelu przeprowadzono symulacje, wykorzystując dane pogodowe roku referencyjnego dla Pragi. Ważne jest aby uwzględnić zużycie energii elektrycznej do napędu wentylatora i chłodnicy. Dla całego systemu chłodnicy założono wartość COP wynoszącą 2,5. Zużycie energii elektrycznej do napędu wentylatora rośnie wykładniczo z wielkością przepływu, zatem porównywanie zużycia chłodu nie reprezentuje dobrze systemu. Zużycie energii do napędu wentylatora obliczono jako funkcję przepływu.

Sumarycznie, symulowano 10 scenariuszy sterowania. W sześciu pierwszych symulacjach testowano różne kombinacje przepływów i czasów pracy instalacji. W następnych pięciu wariantach zredukowano wydajność chłodniczą. Wariant 10 reprezentuje sterowanie budynku bez chłodzenia. Dla porównania wariant FC reprezentuje zachowanie budynku bez ciepłnie aktywnego sufitu (dodatkowa izolacja na wewnętrznej powierzchni) i podłogi (dywan), do pomieszczenia w ciągu godzin pracy dostarczana jest zaledwie minimalna ilość powietrza świeżego a chłód dostarczany jest przez system klimatyzatorów.

Zmiana przepływu powietrza w ciągu dnia i nocy nie wpływa znacząco na całkowite zużycie energii, przypadki 0-5 na rysunku 7.19.



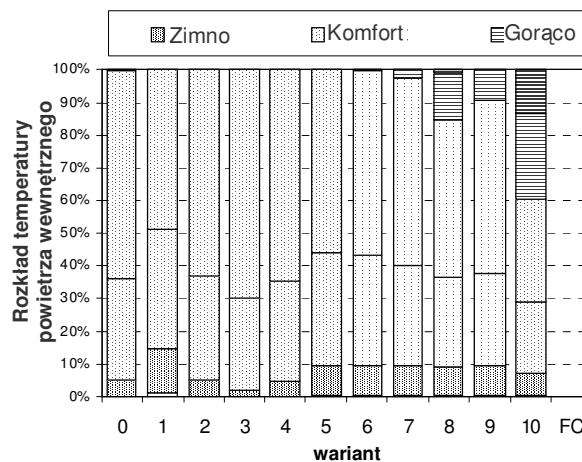
Rys. 7.19.

Porównanie zużycia energii el. dla całego lata i wszystkich testowanych wariantów

Chociaż zużycie energii chłodnicy znacznie maleje ze wzrostem przepływu powietrza, to z drugiej strony większe zużycie energii wentylatora w rezultacie doprowadza do małych różnic w całkowitym zużyciu energii. W wariantach, w których limitowano wydajność chłodniczą (warianty 6-10), całkowite zużycie energii maleje. W przypadkach, kiedy wydajność chłodnicza była ograniczona do 5 kW lub była 0 (warianty 8 i 10)

temperatura powietrza wewnętrznego była powyżej granicy komfortu cieplnego podczas dużej części okresu letniego, co jest nie do przyjęcia (rys. 7.20).

Ostatecznie jako najlepszy wybrano wariant 9, w którym zredukowana wartość przepływu do 1,06 kg/s jest stosowana przez 24 godziny w ciągu dnia, a wydajność chłodnicza jest ograniczona do 7 kW. Dla zadanych danych pogodowych oszacowano całkowite zużycie energii na poziomie 11,6 MWh. W stosunku do wariantu 1 zużycie energii zostało w tym przypadku zredukowane o 12 %. Temperatura powietrza wewnętrznego w żadnej chwili nie przekroczyła 28 °C. Wyniki dla wariantu FC (klimatyzatory i budynek bez znaczącego przepływu ciepła) pokazują, że zużycie energii chłodniczej będzie znacznie wyższe przy systemie klimatyzatorów, ale całkowite zużycie energii elektrycznej będzie najmniejsze z wszystkich wariantów. Wydajność chłodnicy w systemie klimatyzatorów wynosi 27 kW i jest prawie 3 razy większa niż w systemie zoptymalizowanego chłodzenia szczytowego. Zatem koszty inwestycyjne i koszty obsługi dla chłodnicy będą znacznie większe.



Rys. 7.20.

Rozkład temperatury powietrza wewnętrznego

W projektowaniu niskoenergetycznych systemów chłodzenia wykorzystujących nocną wentylację, symulacja komputerowa jest bardzo ważnym narzędziem dla przewidywania komfortu w pomieszczeniach bez systemu mechanicznego chłodzenia i/lub przewidywania wymaganej wydajności chłodniczej do systemów hybrydowych.

Zyski wewnętrzne od wyposażenia biura odgrywają znaczną rolę w bilansie cieplnym budynków biurowych. W rzeczywistości zysk ciepła od biurowych komputerów jest znacznie mniejszy niż nominalna moc podawana na tabliczce znamionowej.

Projektowanie i rozruch niskoenergetycznych systemów są zwykle bardziej skomplikowane niż standardowe systemy HVAC. Wymagają lepszej współpracy wszystkich projektantów, konstruktorów i obsługi budynku. Niekorzystne doświadczenia z niektórymi zrealizowanymi systemami przeważnie mają źródło w braku wymiany informacji. Czasami podczas montażu system zostaje uproszczony w takim stopniu, że nie jest w stanie właściwie pracować. Systemy są również często obsługiwane bez znajomości ich zasady działania.

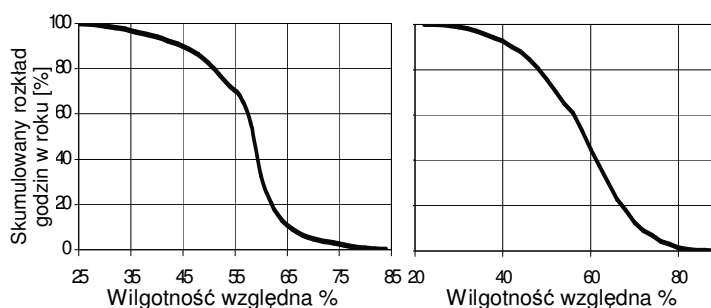
W systemach szczytowego chłodzenia i systemach nocnej wentylacji nie bez znaczenia jest zużycie energii elektrycznej do napędu wentylatorów. Z powodu względnie wysokiego COP systemów mechanicznego chłodzenia, nawet duże oszczędności energii chłodniczej w systemach nocnej wentylacji mogą być zrównoważone przez zużycie energii

elektrycznej do napędu wentylatorów. W celu zredukowania zużycia energii wentylatorów system powinien być zaprojektowany tak, aby występowały w nim małe straty ciśnienia.

Chłodzenie wyparne

Stosowanie bezpośredniego chłodzenia wyparnego w biurowych i mieszkalnych budynkach jest ograniczone z uwagi na komfort cieplny. Jeżeli maksymalna temperatura powietrza wewnętrznego wynosi 26 °C, a wilgotność względna 60%, entalpia powietrza zewnętrznego nie powinna przekraczać 52 kJ/kg. Analiza danych klimatycznych wskazuje, że przez 180 godzin w dni robocze entalpia powietrza zewnętrznego przekracza 52 kJ/kg. oraz przez 82 godziny jego temperatura przekracza 26 °C. Jest to duża część okresu chłodzenia. Dlatego, aby utrzymać komfort przez cały rok chłodzenie wyparne jest zwykle łączone z innym systemem chłodzenia. Maksymalna wydajność chłodnicy nie zmniejszy się znacząco, jeżeli system hybrydowy składać się będzie z urządzenia chłodzenia wyparnego i standardowej chłodnicy. Jednak ilość godzin pracy systemu i zużycie energii wyraźnie spadnie (Lain 2003).

Dla obszarów o wymaganej wyższej wilgotności (niektóre przemysłowe i rolnicze zastosowania) odpowiedniejsze jest chłodzenie wyparne. Przy pośrednim chłodzeniu wyparnym sytuacja jest podobna, jedynie dla nielicznych godzin w roku entalpia powietrza zewnętrznego jest tak wysoka, że system nie może pracować. Chociaż klimat czeski jest średniowilgotny, w budynkach nieprzemysłowych osuszanie nie jest potrzebne. Większość systemów klimatyzacji prowadzi osuszanie za pomocą kondensacji w urządzeniu chłodniczym. Jeżeli w systemie nie występuje kondensacja (lub osuszanie) wilgotność względna przekracza zalecane maksimum (rys. 7.21), (Lain 2003).



Rys. 7.21.

Skumulowany rozkład wilgotności względnej powietrza wewnętrznego dla wszystkich systemów powietrznych (po prawej) i pośredniego chłodzenia wyparnego (po lewej)

Praskie ZOO pawilon "Indonezyjskiej dżungli"

Pawilon „Indonezyjskiej dżungli” jest nową osobliwością praskiego ZOO. Środowisko wewnętrzne, rośliny i zwierzęta reprezentują klimat oraz małą część flory i fauny typowej dla tropikalnej indonezyjskiej dżungli.

Symulacje wykonywane były na etapie projektu koncepcyjnego budynku, tj. przed szczegółowym projektem budynku i systemu ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC). Celem badań symulacyjnych było wsparcie projektantów systemu HVAC, głównie przez kalkulację wymagań energetycznych i przewidywanie maksymalnego obciążenia przy wymiarowaniu systemu HVAC i jego głównych elementów. Model wykonano dla 0, 100 i 200 osób. Jedna osoba była źródłem ciepła 77 W. Bezpośrednie wyparne chłodzenie przez zraszanie wodą w wewnętrznym pawilonie było rozpatrywane

w celu przeanalizowania adiabaticznego chłodzenia powietrza, a w ten sposób możliwości redukcji zużycia energii chłodniczej w okresie letnim i obniżenia maksymalnego obciążenia chłodniczego. Rozważono to jako interesującą opcję w związku z tym, iż Czechy mają względnie suchy, letni klimat natomiast pawilon dżungli wymaga wysokiego poziomu wilgotności względnej, tj. w zakresie od 70 % do 90 %.

Wyniki symulacji wskazują, że zastosowanie wyparnego chłodzenia pozwala zredukować maksymalne obciążenie chłodnicze ok. około 50 kW tj. o 25 %. Czas w którym system chłodzenia nie jest używany może zostać zredukowany z 2000 h do 1000 h w ciągu roku. Liczba godzin operacyjnych z wysokim obciążeniem chłodniczym, np. ponad 120 kW, wyniesie jedynie 80 w ciągu roku.

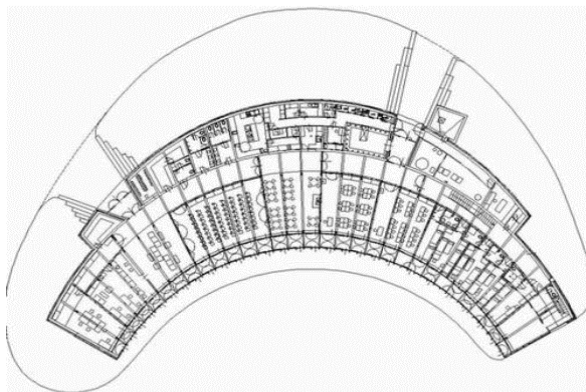
W okresach zapotrzebowania na energię chłodniczą różnice są nawet większe. Bez bezpośredniego chłodzenia wyparnego zapotrzebowanie na energię chłodniczą w ciągu typowego lata wynosi 89 MWh. Przy zastosowaniu bezpośredniego chłodzenia wyparnego i maksymalnej wilgotności względnej powietrza wewnętrznego 70 % zapotrzebowanie na energię chłodniczą spada do 41 MWh (redukcja o 54 %). Przy maksymalnej wilgotności względnej 90 % zapotrzebowanie na energię chłodniczą spada do 13 MWh (redukcja o 85 %).

Chłodzenie gruntowe

Czechy są krajem o niejednorodnym krajobrazie na względnie małej powierzchni. Znajdują się tam regiony o wysokim poziomie wód podziemnych i sztucznych jezior (południowa Bohemia), jak również suche równiny, góry i doliny rzeczne. Gleba jest mocno zróżnicowana w związku z czym, aby znaleźć dobre właściwości gruntu dla stosowania systemów podziemnych, konieczne są badania geologiczne.

Główną barierą do szerokiego wykorzystywania wód gruntowych nie jest tylko ich potencjał ale również czeskie ustawodawstwo. Każdy przypadek wykorzystania termalnych wód gruntowych musi zostać zatwierdzony przez Ministra Środowiska. Jeżeli występuje różnica między wodą wydobywaną a powrotną, nakładana jest opłata za każdy litr wody.

Małe systemy powietrzne z chłodzeniem gruntowym są obecnie popularne w niskoenergetycznych domkach jednorodzinnych z centralnymi systemami powietrznymi, co pozwala na zmniejszenie maksymalnej temperatury w lecie. W Czechach jest tylko jeden większy budynek, w którym wykorzystano chłodzenie gruntowe. Jest to ekologiczne Centrum Edukacyjne Slunakov (SEV) zaprojektowane dla miasta Olomouc (por. rys. 7.22).



Rys. 7.22
Plan budynku Slunakov

W biernych i niskoenergetycznych technologiach chłodzenia bardzo ważne jest dynamiczne zachowanie i oddziaływanie budynku, systemów, użytkowników i środowiska. W projektowaniu i weryfikacji działania takich systemów standardowe metody oparte na szczytowych zyskach nie są właściwe. W przeciwieństwie do tradycyjnych uproszczonych metod obliczeniowych (nie uwzględniających dynamiki systemu), bliższe rzeczywistości jest modelowanie komputerowe. Wykorzystanie modelowania komputerowego i symulacji w projektowaniu i wycenianiu budynków i systemów HVAC jest szybkim przejściem od etapu badań i rozwoju do codziennej praktyki inżynierskiej.

Potencjalne korzyści ze stosowania niskoenergetycznych i pasywnych technologii są bardzo duże w Czechach. Pomimo, że nie ma istotnych technicznych barier, technologie te nie są wprowadzane z powodów ekonomicznych.

Tylko w kilku nowo wybudowanych biurach podczas projektowania była rozważana koncepcja pasywnego chłodzenia. Nie ma żadnego dużego budynku biurowego, w którym zaprojektowano jedynie chłodzenie pasywne. Obecnie uważa się, że dobrym rozwiązaniem pozwalającym na zmniejszenie obciążenia chłodniczego jest projektowanie budynków biurowych o efektywnej masie cieplnej i dobrej jakości zacienienia.

Projektowanie i rozruch niskoenergetycznych systemów są zwykle bardziej skomplikowane, niż standardowe systemy klimatyzacyjne. Wymagają one lepszej koordynacji wszystkich projektantów, konstruktorów i obsługi budynku. Niekorzystne doświadczenia z niektórymi zrealizowanymi systemami przeważnie mają źródło w braku wymiany informacji.

Na koniec, chcieliśmy zaznaczyć, że dla wsparcia projektowania takiego, jak w tym przypadku niezbędny jest duży zakres wiedzy. Banks i Gibson (1997) słusznie podkreślają, że *„Symulacja jest dyscypliną, a nie pakietem oprogramowania; wymaga szczegółowego opisu problemu, ostrożnego przetłumaczenia lub kodowania logiki systemu na symulacyjny język postępowania (niezależnie od typu interfejsu) i dokładnego testowania modelu i wyników. Aby z powodzeniem przeprowadzić symulację wymagane są co najmniej dwie umiejętności. Pierwsza wymaga zdolności rozumienia skomplikowanego systemu i jego wewnętrznych współzależności. Druga wymaga zdolności jego przełożenia na odpowiedni język rozpoznawalny przez program symulacyjny”*. Tak więc w tym przypadku programy nie powinny być tworzone dla każdego, kto chciałby z nich korzystać, ale raczej tak, aby oprogramowanie symulacyjne było efektywniejsze i łatwiejsze dla ekspertów z danej dziedziny. Wydaje się, że takie podejście jest zdecydowanie inne, niż często prezentowane i zalecane w publikacjach dotyczących tematyki "symulacja dla projektowania".

Warto zauważyć, że koszt symulacji jest bardzo niski w porównaniu z rzeczywistymi kosztami. Koszt symulacji rzędu 5-50 tys. euro może zaoszczędzić nawet setki tysięcy czy miliony euro (przy inwestycji w granicach 10-100 milionów euro).

Oczywistą rzeczą jest, że powyższe warunki mogą być spełnione jeżeli symulacje zostały przeprowadzone poprawnie. Obecnie do dyspozycji mamy wiele programów użytkowych oferujących różne udogodnienia – typu „plug&play” czy „click&go”. Niezbędne jest jednak pewne doświadczenie w odpowiednim wykorzystywaniu symulacji.

Największym problemem jest poprawne przyjęcie ilości napływającego powietrza oraz warunków brzegowych. Wychodząc naprzeciw tym trudnościom, firma AFC opracowała wytyczne dotyczące symulacji przepływów powietrza w budynkach (wraz z przykładami zastosowań) oraz przeprowadza cykliczne szkolenia podczas licznych konferencji (np. Roomvent). Opracowania tego typu stale są doskonalone a z najnowszymi wynikami można się zapoznać na stronach internetowych <http://cfdqquality.afc.ch>.

Budynki o niskim zużyciu energii powinny być projektowane ze szczególną starannością, a naczelnym kryterium pozostają warunki komfortu cieplnego użytkownika. Innymi kryteriami są koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, a także ekologiczne. Największym wyzwaniem w tym zakresie są architektoniczne warunki brzegowe.

Symulacje komputerowe są bezcennym narzędziem pozwalającym na poprawne zaprojektowanie budynku, tak pod względem ogólnym, jak i z punktu widzenia oszczędności energii. Dostarczają one dodatkowych informacji na temat różnych rozwiązań na różnych etapach projektowania konkretnego budynku.

Użycie odpowiednich narzędzi symulacyjnych zależy od postawionych pytań oraz oczekiwanych odpowiedzi w zależności od stopnia szczegółowości – symulacje dynamiczne dla całkowitych potrzeb cieplnych budynków czy też bardziej dokładne symulacje w celu zapewnienia komfortu cieplnego użytkowników (przepływy powietrza, itp.) lub skutecznego usuwania generowanych w pomieszczeniu zanieczyszczeń.

Przykłady zaprezentowane w tekście ilustrują możliwość zastosowania odpowiednich narzędzi symulacyjnych w procesie projektowania budynku.

LITERATURA DO ROZDZIAŁU 7

- Adam Ch., André Ph., Aparecida Silva Cl., Hannay J., Lebrun J. 2004: Commissioning-orientated building loads calculations. Application to the CA-MET building in Namur (Belgium). Proceedings International Conference for enhanced building operations (ICEBO'04), Paris
- André Ph., Aparecida Silva C., Fonseca N., Hannay J., Lacôte P. and Lebrun J., 2004: Recommissioning of a VAV air distribution system. Proceedings International Conference for enhanced building operations, ICEBO, Paris
- André Ph., Cuevas Ch., Lacôte P. and Lebrun J. 2003: Re-commissioning of the CA-MET HVAC system: a successful case study? Proceedings International Conference for enhanced building operations (ICEBO'03), Berkeley
- André Ph., Lacôte P., Aparecida Silva C., Hannay J. and Lebrun J. 2004: A Functional Test Procedure for the improved commissioning of a VAV system. Proceedings International Conference for enhanced building operations, ICEBO'04, Paris
- André Ph., Lacôte, P., Adam Ch., Collard L., Cuevas Ch., Delarge, O., Georges B., Lebrun J. 2002: Use of simulation in the commissioning of an office building. Proceedings, SSB'Congress, Liège
- Augenbroe G., Eastman C. 1998: Product modeling strategies for today and the future, The Life-Cycle of Construction Innovations: CIB Working Conference, June 3-5, Stockholm Sweden
- Augenbroe G.L.M., Hensen J.L.M. 2004: Simulation for better building design, *Building and Environment*, 38
- Baehr H. D., Stephan K. 1996: Wärme- und Stoffübertragung. Springer Lehrbuch, 2. Auflage
- Banks J., Gibson R. R. 1997: Simulation modelling – some programming required. IIE Solutions

- Banks, J., Gibson, R.R. 1997: Don't simulate when...10 Rules for determining when simulation is not appropriate, in IIE Solutions
- Barnard N., Jaunzens D. 2001: Low Energy Cooling – Technology Selection and Early Design Guidance. Building Research Establishment Ltd, London
- Barták M., Drkal F., Hensen J., Lain M. et al. 2001: Simulation for (Sustainable) Building Design: Czech Experiences, Clima 2000 – Napoli, Milan, p. 354-363
- Bartak M., Drkal F., Hensen J., Lain M., 2001: Design Support Simulations For The Prague Zoo "Indonesian Jungle" Pavilion, BS 2001, IBPSA, p.841-845
- Bazjanac, V., Crawley, D., 1999: Industry foundation classes and interoperable commercial software in support of design of energy-efficient buildings. In: Nakahara, Yoshida, Udagawa and Hensen, ed. Building Simulation '99, 6th International IBPSA Conference, Kyoto, Japan., September 13-15 1999, 661-667
- Beausoleil-Morrison I. 2001: The adaptive coupling of heat and air flow modeling within dynamic whole-building simulation. PhD thesis. University of Strathclyde, Glasgow UK
- Behne M. 1997: Alternatives to Compressive Cooling in Non-Residential Buildings to Reduce Primary Energy Consumption. Final report, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California
- BLIS 2002: Building Lifecycle Interoperable Software website [online]. Available from <http://www.blisproject.org/>
- Bloor M.S., Owen J. 1995: Product data exchange, UCL Press, London.
- Bunn R 2001: Specifying on the net. *Building Services Journal*, 2,49-50, Chartered Institute of Building Services Engineers (CIBSE), London
- Crawley, D.B., Lawrie, L.K., 1997: What next for building energy simulation – a glimpse of the future. In: Spittler and Hensen, ed. Building Simulation '97, 5th International IBPSA Conference, Prague, Czech Republic, September 8-10 1997, volume II, 395-402
- Cuevas Ch., Lebrun J., Lacôte P., André Ph. 2002: Re-commissioning of an Air handling Unit. Proceedings ABT'2002 Congress, Hong-Kong
- Djunaedy, E. 2005: External coupling between building energy simulation and computational fluid dynamics, Doctoral dissertation Technische Universiteit Eindhoven.
- Dols W. S., Walton G. N. 2002: CONTAM 2.0 User Manual: Multizone Airflow and Contaminant Transport Analysis Software, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6921 Gaithersburg, USA
- Duška M., Drkal F. and Lain M., 2004: Tepelné zisky z vnitřních vybavení administrativních budov. *Vytápění, Větrání, Instalace magazin*, 198-201
- Dvorak J. 2002: Hlavní sprava CEZ: nocni chlazení. Proc. Simulace budov a techniky prostředí 2002, IBPSA-CZ, 15 – 17
- Eastman, C.M., 1999: Building product models: computer environments supporting design and construction. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press
- Elkhuizen P.A., Peitsman H.C., Wienk W.J. 2003: A new design guideline for the heating and cooling curve in AHU of HVAC systems. *Building Services Engineering Research and Technology*, 24: 3, 191-202
- Elkhuizen P.A., Scholten J.E., Peitsman H.C., Kooijman A. 2004: The effect of optimal tuning of the Heating-/cooling curve in AHU of HVAC system in real practise. Proceedings, ICEBO, Paris
- ESP-r (Environmental Systems Performance – research) software www.esru.strath.ac.uk
- ESRU 1997: The ESP-r System for Building Energy Simulation, User Guide Version 9 Series. ESRU Publication, University of Strathclyde, Glasgow
- Ferdyn-Grygierek J. 2004: Efektywność energetyczna ogrzewania i wentylacji budynków edukacyjnych. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice
- FLUENT-Manual (Version 6.0)
- Foít H., Król M., Lubina P. 2004: Zaopatrzenie w ciepło pasywnych budynków mieszkalnych., *Zeszyt Inżynierski nr 2, ENER-INDOOR*, Gliwice
- Fringer O. B. 1999: Numerical simulation of breaking interfacial waves. Dissertation. <http://fluid.stanford.edu/~fringer/>
- Fuhrbringer JM, Roulet CA. 1999: Confidence of simulation results: put a sensitivity analysis module in your MODEL – The IEA – ECBCS Annex 23 experience of model evaluation. *Energy and Buildings*; 30: 61 – 71.
- Gawin D., Kossecka E. 2002: Typowy rok meteorologiczny do symulacji wymiany ciepła i masy w budynkach. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź
- Heap R.D. 2001. Refrigeration and air conditioning – the response to climate change. *Bulletin of the IIR*-2001-5
- Henkes R.A.W.M., Van Der Vlugt F. F., Hoogendoorn C.J. 1991: Natural Convection Flow in a Square Cavity Calculated with Low-Reynolds-Number Turbulence Models. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 34, 377-388

- Hensen JLM, Hamelinck MJH, Loomans, MGLC. 1996: Modelling approaches for displacement ventilation in offices. Roomvent '96 Proceedings of the 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, Yokohama.
- Hensen, J. L. M. 2004: Towards more effective use of building performance simulation in design", in Proc. 7th International Conference on Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning, 2-5 July, Technische Universiteit Eindhoven.
- Hensen, J.L.M. 1991: On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system. Doctoral dissertation Technische Universiteit Eindhoven.
- Hensen, J.L.M. 1993: Design support via simulation of building and plant thermal interaction, Design and Decision Support Systems in Architecture, ed. H. Timmermans, pp. 227-238, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (NL).
- Hensen, J.L.M., Clarke J.A. 2000: Building systems and indoor environment: simulation for design decision support. Proc. International Conference on Design and Decision Support Systems in Architecture & Urban Planning, Nijkerk, August 22-25, Vol. Architecture, pp. 177-189, Eindhoven University of Technology.
- Hensen, J.L.M., Nakahara N. 2001: Building and environmental performance simulation: current state and future issues, *Building and Environment*, **36: 6**, 671-672.
- Hofmeister O., Kopecký P., Tywoniak, J. 2004: SLUNAKOV Ecological Education Center – Basic information. Internal report, Prague
- Hong, T.; Chou, S.K.; Bong, T.Y., 2000: Building simulation: an overview of developments and information sources. *Building and Environment*, **35:4**, 347-361
- IEA, 1995. Review of Low Energy Cooling Technologies. Natural resources Canada. Ottawa, Canada, 88 p.
- Judkoff, R. Neymark J. 1995: International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method. National Renewable Energy Laboratory.
- Kleijnen JPC. 1997: Sensitivity analysis and related analyses: A review of some statistical techniques, *Journal of Statistical Computation and Simulation*; **57**: 111 – 142.
- Kriegel B. 1973: Fallströmungen vor Abkühlungsflächen in Gebäuden und mögliche Schutzmaßnahmen, Dissertation an der TU-Berlin
- Kusuda, T. 2001: Early history and future prospects of building system simulation, Proc. Building Simulation '99 in Kyoto, 3-15, International Building Performance Simulation Association – IBPSA.
- Lain M., Drkal F., Hensen J., Zmrhal V. 2004: Low Energy Cooling Techniques for Retrofitted Office Buildings in Central Europe. Ventilation and Retrofitting Prague, AIVC Brussels, p. 79-84
- Lain M., Duška M., Matějček K. 2003: Applicability of Evaporative Cooling Techniques in the Czech Republic. Proceedings 21st International Congress of Refrigeration, Washington DC, IIR Paris
- Lauder B. E.; Spalding D. B. 1974: Numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Energy* **3**, 269 - 289
- Lebrun J., Aparecida Silva C. 2002: Cooling tower – model and experimental validation. ASHRAE Symposium, Atlantic City
- Liddament M.W., 2000: Low energy cooling, ESSU, Coventry, U.K.
- Lomas K J, Eppel H. 1992: Sensitivity Analysis Techniques for Building Thermal Simulation Programs, *Energy and Buildings*; **19**: 21 – 44.
- Masy G. 2004: Modelling of residential building and heating systems. Proceedings, ICEBO, Paris
- Mundt E. 1996: The Performance of Displacement Ventilation Systems. Ph.D. Thesis, Royal Institute of Stockholm
- Murakami S., Kato S., Chikamoto T. 1992: Numerical Simulation of Velocity and Temperature Fields within Atrium based on Modified k-ε Model Incorporating Damping Effects due to Thermal Stratification. NST Research Group Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo
- Negrao COR. 1995: Conflation of Computational Fluid Dynamics and Building Thermal Simulation, PhD Thesis. Glasgow: University of Strathclyde
- Neymark, J., R. Judkoff, G. Knabe, H.-T. Le, M. Durig, A. Glass, Zweifel G. 2001: HVAC BESTEST: A procedure for testing the ability of whole-building energy simulation programs to model space conditioning equipment. 7th International IBPSA Conference, 369-376.. Brazil, International Building Performance Simulation Association.
- PN-83/B-03430 (wraz ze zmianą Az3:2000) – Wentylacja w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej
- Prill R., Blake D., Hales D. 2002. School indoor air quality assessment and program implementation, Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Monterey: Indoor Air 2002

- Radosevic, M., Hensen, J. L. M., & Wijsman, A. J. T. M. 2005: Implementation strategies for distributed modeling and simulation of building systems, in Proc. 9th Int. IBPSA Conference, 15 - 18 August, International Building Performance Simulation Association, Montreal
- Reichert E. 2000: Ein Verfahren zur Bestimmung des Energie - und Stoffaufwands zur Luftbehandlung bei raumluftechnischen Anlagen. Universität Stuttgart, Stuttgart
- Rodi, W. 1987: Turbulence models and their application in Hydraulics – A state of the art review. Int. Assoc. Hydr. Res., Rotterdam
- Santamouris M., Asimakopoulos D. 1996: Passive Cooling of Buildings. James&James Ltd., London, U.K., 472 p.
- Schaelin A. 2003: Zone Separation by Ventilation Design for Contaminant Control in Rooms with Strong Disturbances. Ventilation 2003, August 5-8, Sapporo, Japan
- Schaelin A. 2004: Complex Air Flow Behavior in Complex Spaces – Design Optimization by CFD, Realization and Visualization. ROOMVENT 2004, 9th International Conference, Sept 5-8, Coimbra, Portugal
- Schaelin A. 2005: Virtual Separation of Smoker and Non-Smoker Zones by Proper Ventilation Design. Clima 2005, Lausanne, Switzerland
- Slater S, Cartmell B. 2003: Hard working software. *Building Services Journal*; February: 37 – 40.
- Sowa J., Bartkiewicz P. 1997: Stężenie dwutlenku węgla jako źródło informacji o jakości powietrza w pomieszczeniach. 6. Konferencja naukowo-techniczna Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Łódź' 1997, 336-345
- Thompson, B. 1998: Engineers, IAQ, and schools. *ASHRAE Journal*, June, 22-26
- Vaezi-Nejad H. 2004: Retro-commissioning the Aria building using Cite-AHU: an Annex 40 collaboration. Proceedings, ICEBO, Paris
- Venayagamoorthy S. K.; Koseff J. R.; Ferziger J. H.; Shih L. H. 2003: Testing of RANS turbulence models for stratified flows based on DNS data. Center of Turbulence Research, Annual Research Briefs
- Visier J-Chr et al 2005: IEA ECBCS Annex 40 Commissioning HVAC systems for improving energy performance. Final report
- Wang S. 2004: Health monitoring and continuous commissioning of centrifugal chiller plant. Proceedings, ICEBO, Paris
- Weinläder H., Beck A., Fricke J. 2000: Demand Controlled Ventilation in Schools– Energetic and Hygienic Aspects, Proceedings 21st AIVC Annual Conference, Innovations in Ventilation Technology, paper 6
- Wilde, P. de, 2004: Computational Support for the Selection of Energy Saving Building Components. PhD-thesis. Delft University of Technology, Faculty of Architecture, Building Physics Group, Delft, the Netherlands
- Wolfstein, M. 1969: The Velocity and Temperature Distribution of One-Dimensional Flow with Turbulence Augmentation and Pressure Gradient. *Int. J. Heat Mass Transfer*
- Yahiaoui, A., Hensen, J., Soethout, L., & Paassen, A. H. C. v. 2005: Applying advanced control strategies in building performance simulation by using run-time coupling, Proc. 8th REHVA World Congress, Clima 2005, 9 - 12 October, REHVA - Federation of European Heating, Ventilating and Air-conditioning Associations, Lausanne