



مدل ذخیره حرارت بلند مدت هیبرید (PCM و خاک) برای سیستم گرمایش خورشیدی

عبدالرزاق کعبی نژادیان^{۱*}، Y. Nakajima^۳، K. Watanabe^۲

۱- سازمان انرژیهای نو ایران، تهران

2- Professor, Faculty of Science and Technology, Keio University, Tokyo, Japan

3- Professor, Department of Architecture, Kogakuin University, Tokyo, Japan

*تهران، ۱۱۶۹-۱۴۶۶۵، kaabi@iranenergy.org.ir

چکیده

در این تحقیق، عملکرد سیستم نوین ذخیره بلند مدت انرژی خورشیدی جهت گرمایش با استفاده از محاسبات شبیه سازی مورد مطالعه قرار گرفت. سیستم شامل ماده با تغییر فاز $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ برای ذخیره حرارت کوتاه مدت، محفظه ذخیره حرارت محسوس - که دارای تانک آب گرم بوده و بوسیله قلوه سنگ احاطه شده است - و پمپ حرارتی برای ذخیره حرارت میان مدت و همچنین خاک برای ذخیره حرارت بلند مدت می باشد. محاسبات نشان می دهد که Heat gain بیشتری نسبت به تک محفظه ذخیره که در قبل مطالعه شده، بدست می آید. سیستم تک محفظه ای از راه تحلیلی و نظری، مقایسه استفاده از PCM و قلوه سنگ، که شامل عملکرد پمپ حرارتی در همان محفظه است مورد مطالعه قرار گرفت. به روش آنالیز و طراحی روش آزمایش (Experimental design)، جهت دستیابی به راندمان بیشتر PCM تأثیر ۶ فاکتور متغیر بر روی عملکرد سیستم مورد مطالعه قرار گرفت.

کلیدواژگان: ذخیره حرارت کوتاه مدت، ذخیره حرارت میان مدت، ذخیره حرارت بلند مدت، PCM، پمپ حرارتی

Model of hybrid long- term heat storage (PCM and soil) for solar heating system

A. Kaabi- Nejadian^{1*}, K. Watanabe², Y. Nakajima³

1- Renewable Energy Organization of Iran, Tehran

2- Professor, Faculty of Science and Technology, Keio University, Tokyo, Japan

3- Professor, Department of Architecture, Kogakuin University, Tokyo, Japan

* P.O.B. 14665-1169 Tehran, Iran, kaabi@iranenergy.org.ir

Received: 27 December 2015 Accepted: 9 February 2016

Abstract

The operation of a novel solar-energized long term storage system has been studied using computer simulation. The system uses a phase change material (PCM) consisting $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ for short-term heat storage; crushed-rocks sensible heat storage bin with enclosed hot water tank and heat pump system for medium-term heat storage, and soil for long-term heat storage. Calculations indicate that this system will provide a higher heat gain than a single bin system studied earlier. The single bin system was studied analytically and theoretically, comparing the use of a PCM and crushed-rocks, and included a heat pump operating from the same bin. Due to analysis and design method of experiment, the effect of six variance factors on system performance for higher PCM efficiency was studied.

Keywords: short-term heat storage; medium-term heat storage; long-term heat storage; PCM; heat pump

مقدمه

بوسیله فن کاهش پیدا کرده، و ذخیره حرارت و حرارت حاصل موثر از PCM را نمی توان تشخیص داد.

۲- در سیستمهایی که از قلوه سنگ پر شده است و شامل تانک آب گرم (ذخیره گرمایش کوتاه مدت)، قلوه سنگ (ذخیره گرمایش میان مدت)، و خاک (ذخیره گرمایش بلند مدت) هستند، تابع بهره وری بهتر می باشد. زمانی که PCM جانشین قلوه سنگ می شود آنگاه گرمای حاصله از خاک کاهش می یابد.

به منظور برطرف نمودن اشکالات سیستم پر از PCM فوق مدل PCM پیشرفته و توسعه یافته پیشنهاد می شود. در این مدل پیشرفته ترکیبی از محفظه ذخیره حرارت نهان (Latent heat) که با PCM پر شده به منظور ذخیره حرارت کوتاه مدت استفاده می شود، یک محفظه حرارت محسوس (Sensible heat storage) با تانک آب گرم و قلوه سنگ به منظور ذخیره حرارت میان مدت، و خاک برای ذخیره حرارت بلند مدت استفاده می شود. تانک آب مرکزی (Kernel tank) در دمای بسیار بالایی قرار دارد و محفظه ذخیره حرارت نهان در دمای متوسط و محفظه ذخیره حرارت محسوس در دمای پایین تری قرار دارد. در محفظه حرارت محسوس یک واحد پمپ حرارتی خارج نصب شده است تا گرمای بیشتری از خاک بدست آید. مدل شبیه سازی شده به همراه دیاگرام منطقی سیستم به ترتیب در شکل ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است.

برای محاسبات شبیه سازی، معادلات بالانس حرارتی برای هر بخش از سیستم به شرح ذیل، نوشته شده است.

- ۱- معادله بالانس حرارت برای گردآورنده خورشیدی
- ۲- معادله بالانس حرارت برای تانک پر از PCM
- ۳- معادله بالانس حرارت برای محفظه ذخیره حرارت نهانی
- ۴- معادله بالانس حرارت برای کوئل گرمایش
- ۵- معادله بالانس حرارت برای تانک آبگرم
- ۶- معادله بالانس حرارت برای دیوار بتنی
- ۷- معادله بالانس حرارت برای محفظه ذخیره حرارت محسوس
- ۸- معادله بالانس حرارت برای رادیاتور

توزیع حرارتی در محفظه های تانک مرکزی و نهانی و محسوس در حالت پایدار تعریف شده اند. بنابراین هر محفظه ذخیره گرمایش می تواند با یک ترم ناشناخته تعریف شود. یک مدل ساختمان خاص در این شبیه سازی مد نظر نمی باشد و فرض می شود که دمای اتاق متغیر باشد (از ساعت ۸ تا ۲۳ دما ۲۰ درجه سانتیگراد و از ساعت ۲۴ تا ۷ دمای ۱۶ °C باشد). بر اساس نتایج مقدار گرمای منتقل شده بین فضای اتاق و سیستم تخمین زده می شود و ارزش عملکرد سیستم به بار حرارتی ساختمان مرتبط نیست. مقدار گرمای مصرفی یک ساختمان بر اساس زمان عملکرد تجهیزات و درجه حرارت فضای اتاق قابل تعیین است. برای معادله مشخصه PCM رنج درجه حرارت تغییر فاز تعیین شده و ظرفیت گرمایی PCM در سه حالت جامد، جامد و مایع، و مایع محاسبه شده است. بایستی توجه داشت ظرفیت PCM شامل سیالاتی نظیر هوا و آب اطراف PCM نیز می باشد. فرض می شود که درجه حرارت هوا و آب اطراف PCM یکنواخت باشد بنابراین، بین عناصر تبادل گرمایی صورت نمی گیرد. مشخصات فنی PCM استفاده شده در محاسبات در جدول ۲ نشان داده شده است. برای تعیین توزیع درجه حرارت در خاک برای یک مدل مستطیلی شکل درجه حرارت اولیه نسبت به دما هوای خارج برای عمق ۳ متری زمین دورتر از سطح محفظه گرمایش محسوس محاسبه می شود. سپس روش اختلاف تفاضلات محدود (Explicit Finite difference) برای توزیع درجه

در ایبن تحقیق، سیستم گرمایش دراز مدت با استفاده از انرژی حرارتی خورشیدی که در زیر زمین ذخیره می شود مورد مطالعه قرار می گیرد. در این مقاله محفظه ذخیره حرارت در زیر زمین را برای دراز مدت که بتوان از انرژی خورشیدی استفاده کرد با استفاده از مواد (PCM Phase Change Material) (مواد تغییر فاز) بجای قلوه سنگ مورد مطالعه قرار گرفته است. آنالیز شبیه سازی و آنالیز اندازه گیری برای این نمونه انجام گرفت و ویژگیهای PCM روشن شد. بر اساس نتایج بدست آمده، برای کسب راندمان بیشتر از PCM مدل ذخیره انرژی خورشیدی توسعه یافته بلند مدت PCM در زیرزمین برای سیستمهای گرمایش پیشنهاد می شود. دلایل پیشنهاد این مدل پیشرفته بشرح زیر می باشد.

- ۱) عملکرد PCM در آغاز مطالعه ضعیف بود، در صورتیکه در مدل پیشرفته PCM فراهم نمودن ماکزیم ظرفیت گرمایی ذخیره شده در یک حجم کوچک امکان پذیر شده بعلاوه گرمای نهانی موثر PCM بکار رفته در سیستم بمراتب بیشتر و بهتر است.
- ۲) پمپ حرارتی (Heat pump) و فن می توانند برای بدست آوردن بهترین کارایی (COP) سیستم طراحی شده کار نمایند.
- ۳) سیستم حرارت مرکزی ضمن ذخیره حرارت، حداقل اتلاف حرارت را دارا می باشد. هدف ما بازیابی حداکثر حرارت از سطح خاک اطراف و اجتناب از برهم کنش بین پمپ حرارتی و فن می باشد.

شکل (۱) معادلات بالانس حرارت برای ۸ نقطه مشخص به صورت معادلات خطی نوشته و ایجاد کرده که دارای ۸ ترم ناشناخته $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_{w1}, \theta_{w2}, \theta_{w3}, \theta_{w4}, \theta_{w5})$ می باشد. ۸ ترم ناشناخته می تواند تماماً با کامپیوتر محاسبه شوند. در این مقاله از درجه حرارت خارج، تابش مستقیم، تابش پراکنده خورشیدی بر روی سطح افقی در محاسبات استفاده می شود. در مدل ساده فرض شد که عناصر اساسی پیشنهاد شده در سیستم و شرایط عملکرد سیستم به صورت فاکتورهای متغیر در نظر گرفته شوند. بوسیله روش طراحی آزمایش، اثر این فاکتورهای متغیر بر روی عملکرد سیستم آزمایش می شوند. اثرات ۶ فاکتور متغیر بر روی عملکرد سیستم جهت دستیابی به بالاترین راندمان PCM، فاکتورهای متغیر شامل سطح کلکتور خورشیدی، مقادیر PCM، ظرفیت هوای فن، جدول زمانی عملکرد فن، جدول زمانی عملکرد پمپ حرارتی و جدول زمانی عملکرد پانلهای رادیاتورها می باشند که در جدول ۱ نشان داده شده است. این فاکتورها در سه سطح در نظر گرفته می شوند. بنابراین سه سطح ثابت برای شش فاکتور متغیر در نظر گرفته می شوند به عبارتی ۸۱ شرایط آزمایشی وجود دارد که ممکن است بر روی عملکرد سیستم موثر باشند.

مدل شبیه سازی

در مقایسه سیستم گرمایش خورشیدی با استفاده از ذخیره حرارت بلند مدت PCM در زیر زمین و مدل قلوه سنگ در مدل پیشین (با یک محفظه (PCM)) ویژگیهای زیر مشاهده شد.

- ۱- در زمان کارکرد توامان پمپ حرارتی و فن، مشاهده می شود که مقدار حرارت حاصل از عملکرد فن بالاست که این نشانه ای از بالا بودن دمای مخزن ذخیره حرارت زیرزمین می باشد. اما، وقتی دمای مخزن به سطح دمای عملکرد پمپ حرارتی در نتیجه افزایش دبی هوا و زمان عملکرد فن برسد، در این حالت حرارت حاصله بوسیله پمپ حرارتی مصرف می شود و هیچگونه حرارتی بطور مستقیم از طریق فن حاصل نمی شود. میزان حرارت حاصل

تغییرات درجه حرارت محفظه ذخیره حرارت برای تاریخ های فوق در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل ۷ همچنین شرایط آزمایش را برای مدل ۷۲ در سطح سوم زمان بندی عملکرد فن نشان می دهد.

گرمای حاصل و تغییرات تابش خورشیدی در شکل ۸ نشان داده شده است. تغییرات دمای هر محفظه ذخیره حرارت و تانک آب گرم مرکزی در شکل ۷ نشان داده شده است و تغییرات برای محفظه ذخیره گرمایش نهان و محفظه ذخیره گرمایش محسوس به بزرگی تانک مرکزی نمی باشد.

دمای تانک مرکزی پائین می آید، و محفظه ذخیره گرمایش نهان و محفظه ذخیره گرمایش محسوس همچنین مشخص شده اند درجه حرارت محفظه ذخیره گرمایش محسوس اثری مهم بر روی زمان عملکرد پمپ حرارتی دارد و برای شرایط محاسبات مدل ۷۲، دمای محفظه ذخیره گرمایش محسوس از ۲۴/۴ درجه سانتی گراد تا ۲۶/۴ درجه سانتی گراد افزایش می یابد، و بر اساس آن با عملکرد پمپ حرارتی Heat gain اتفاق می افتد. زمانیکه پمپ حرارتی عمل می کند گرمای حاصل به وسیله فن در مقایسه با زمانی که پمپ حرارتی کار نمی کند به ۲۰٪ افت می کند. بر هم کنش بین فن و پمپ حرارتی به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد.

نتیجه گیری

آنالیز متغیرها نشان می دهد که بر هم کنش بین فن و واحد پمپ حرارتی در مدل ذخیره انرژی خورشیدی توسعه یافته بلند مدت PCM در زیرزمین برای سیستمهای گرمایش خورشیدی از بین رفته است در این مطالعه اثر مهم جدول زمان بندی عملکرد فن قطعی شده است در ضمن اثر سطح کلکتور خورشیدی نیز بیان شده است. به طور کلی نتایج ذیل از ۸۱ محاسبه مختلف حاصل شده است.

الف) بالاترین COP (کارایی) سیستم با توجه به جدول زمان بندی عملکرد فن (۶ ساعت در روز مطلوب می باشد).

ب) بالاترین میزان بازایافت حرارت از خاک با توجه به زمان بلند مدت عملکرد فن بدست می آید.

ج) اثر زمان عملکرد فن برای COP (کارایی) پمپ حرارتی و بازده کلکتور خورشید قابل توجه نیست.

د) بالاترین COP (کارایی) سیستم از مدل ۷۲ بدست می آید به طوری که گرمایش حاصل از خاک این مدل در مقایسه با مدل شماره ۳۶ که دارای بیشترین گرمای حاصل از خاک به میزان ۱۶٪ است قابل ملاحظه نیست.

مراجع

- [1] عبدالرزاق کعبی نژادبان، فناوری ذخیره انرژی: ذخیره حرارت محسوس و کلیات فناوری ذخیره حرارتی، جلد اول، عبدالرزاق کعبی نژادبان، پاییز ۱۳۹۲، چاپ اول
- [2] عبدالرزاق کعبی نژادبان، فناوری ذخیره انرژی: ذخیره حرارت نهانی و ذخیره حرارت شیمیایی، جلد دوم، عبدالرزاق کعبی نژادبان، پاییز ۱۳۹۴، چاپ اول
- [3] Y. Nakajima et al., Research of long-term underground solar energy storage and heat pump system. Part (1)-(7), summaries of technical papers of annual. Meeting of AIJ, 1981-1984.
- [4] Y. Nakajima et al., Design and analysis for solar residence with long-term latent heat storage system through underground. Part (7)-(10), summaries of technical papers of JSES, 1981-1984.
- [5] Y. Nakajima et al., Study of thermal peculiarity of ground thermal storage material. Part (1)-(6), summaries of technical papers of AIJ, 1980-1985.
- [6] A. Abhat, Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. Solar Energy 30, 313-331 (1983)

حرارت صورت می گیرد که به صورت دو بُعدی و ناپایدار در نظر گرفته می شود. نتایج مطالعات قبلی تغییرات خصوصیات حرارتی خاک با عمق خاک تایید شده است.

در این مقاله محفظه ذخیره گرمایی زیر زمین در عمق خاک ۲/۵ متری در نظر گرفته می شود. خصوصیات گرمایش خاک برای عمق ۲ متری خاک تعریف شده و فرض شده است که یکنواخت باقی می ماند.

شرایط ثابت مدل شبیه سازی در جدول ۳ بیان شده است. ماکزیمم ۸ ترم ناشناخته در سیستم مدل یاد شده وجود دارد. بسته به عملیات زمان بندی شده سیستم و دمای قبلی، هر ترم ناشناخته می تواند به وسیله معادله خطی با برنامه کامپیوتری محاسبه شود.

روش محاسباتی

فاکتورهای متغیر سیستم شامل سطح کلکتور خورشیدی، وزن PCM، ظرفیت هوای فن، زمان عملکرد فن، زمان عملکرد پمپ حرارتی و رادیاتور در جدول ماتریسی (3) L81 در ۳ سطح ۶ فاکتور (جدول ۴) مرتب شده اند.

اثرات ضریب عملکرد سیستم «(860×میزان کل مصرف برق سیستم)»/میزان کل حرارت حاصل از سیستم، ضریب عملکرد پمپ حرارتی برابر است با مقدار کل گرمایش حاصل به وسیله پمپ حرارتی بر مقدار کل گرمای مصرفی سیستم $\times 860$ و راندمان کلکتور خورشیدی برابر حرارت مفید حاصله بر کل تابش خورشیدی و نسبت گرمایش حاصل از خاک (میزان حرارت حاصل از خاک به گرمایش حاصل از کلکتور) بر روی عملکرد سیستم بوسیله شبیه سازی کامپیوتری امتحان می شود.

اثرات فاکتورهای متغیر می توانند بوسیله ۸۱ محاسبه در طراحی آزمایش جمع بندی شوند.

نتایج محاسبات

نتایج آنالیز متغیر (ANOVA) برای COP (کارایی) سیستم، COP پمپ گرمایش، راندمان کلکتور خورشیدی و مقدار گرمای حاصل از خاک در فصل زمستان از دسامبر تا مارس در جداول ۵ تا ۹ نمایش داده شده است.

این جدول اثرات مهمی را برای زمانبندی عملکرد فن با توجه به COP سیستم، COP پمپ گرمایش، بازده کلکتور خورشیدی و مقدار گرمایش حاصل از خاک را نشان می دهد. سطح غیر مفید برای مقدار ۱ و ۵ درصد در نظر گرفته می شود. شکلهای ۳ تا ۶ نتایج حاصل از ANOVA بدست آمده است و فاکتور متغیر برای ۳ سطح نشان داده شده است. شکل ۶ افزایش مقدار گرمای حاصل از خاک به وسیله افزایش زمان بندی عملکرد فن را نشان می دهد. شکل ۳ نشان می دهد که COP سیستم بعد از ۶ ساعت کارکرد فن کاهش می یابد. با توجه به داده های هواشناسی برای تابش نرمال مستقیم و تابش پراکنده خورشید و دمای خارج، مدل نمونه ۷۲ بالاترین COP برای مقایسه انتخاب شده و در تاریخ ۶،۷، ۸ فوریه در شرایط هوای صاف، روشن، ابری بررسی شده است. مدل های شماره ۷۲ و ۳۶ و ۲۴ و ۱۸ بترتیب بالاترین کارایی سیستم، گرمایش حاصل از خاک، بالاترین راندمان کلکتور خورشیدی و COP پمپ گرمایش را دارا می باشند.

شرایط محاسباتی برای نمونه شماره ۷۲ شامل سطح کلکتور خورشیدی ۲۰ متر مربع، وزن PCM برابر ۷۳۳ کیلوگرم، ظرفیت هوای فن ۳۵۰ متر مکعب بر سرعت، زمان عملکرد فن ۱۲ ساعت، زمان عملکرد پانلهای رادیاتور ۴ ساعت، و زمان عملکرد پمپ حرارتی ۳ ساعت می باشد.

Presented at ASME Meeting, San Francisco, Calif. 10-15 Dec. 1978
 [9] J. Shelton, Underground storage of heat in solar heating system. Solar Energy 17, 137-143 (1975)
 [10] M. Telkes, Solar energy storage. ASHRAE J. 16, 38 (1974)

[7] N. A. Malatidis and A. Abhat, Investigation of the thermophysical behaviour of calcium chloride 6-hydrate for use as heat storage material in latent heat stores (in German). Forschung Ingenieur-Wesen 48, 1-26 (1982)
 [8] V. A. Costello, S. S. Melsheimer and D. D. Edie, Heat transfer and calorimetric studies of a direct contact-latent heat energy storage system. Thermal storage and heat transfer in solar energy system.

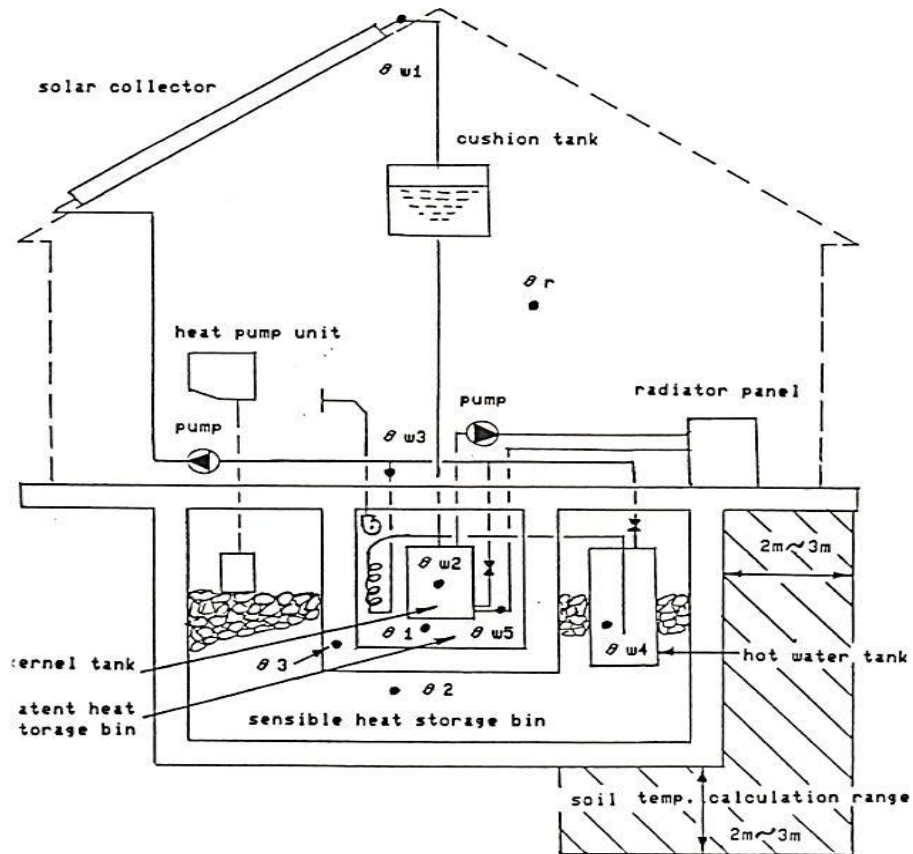
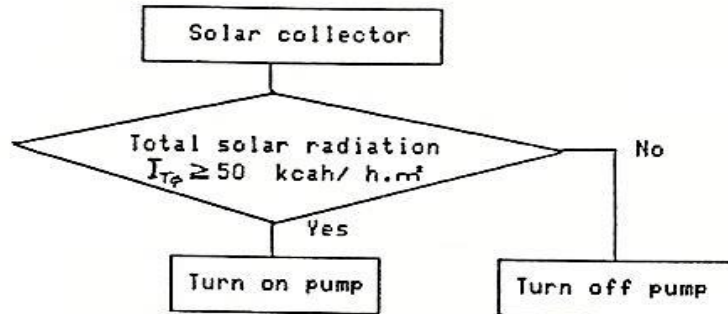


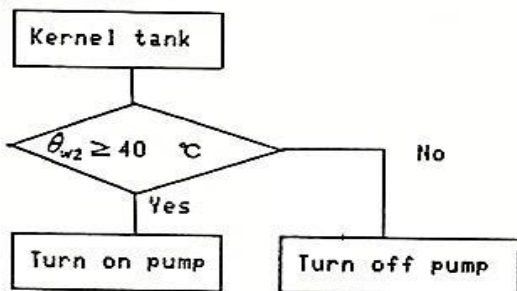
Fig.1 Diagram of the System Simulation

Control logic of producing energy zone

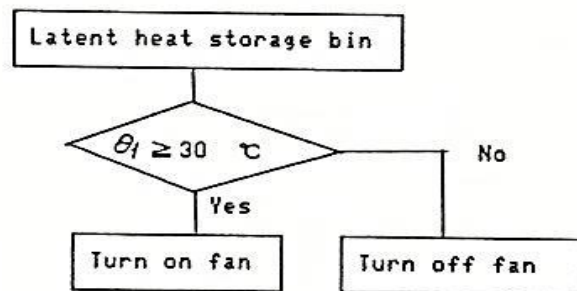


Control logic of discharge energy zone

Radiator panel zone
(pump)



Fan zone
(Fan)



Heat pump zone
(Heat pump)

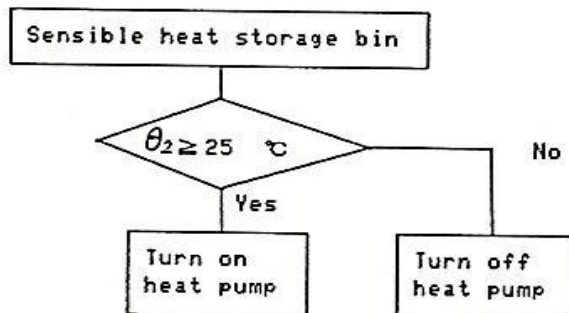


Fig. 2 Control logic for a typical solar energy system

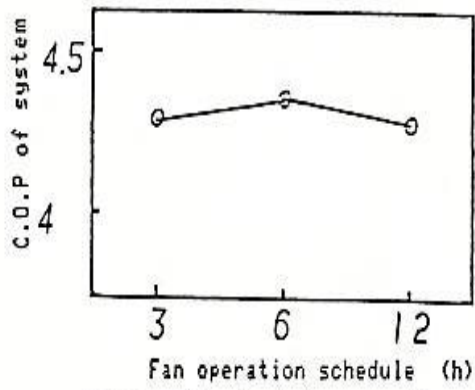


Fig.3 Effect of fan operation schedule for c.o.p of system

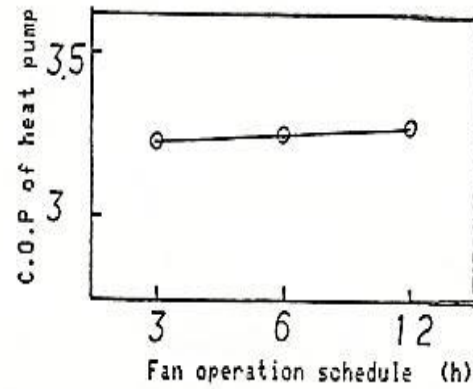


Fig.4 Effect of fan operation schedule for c.o.p of heat pump

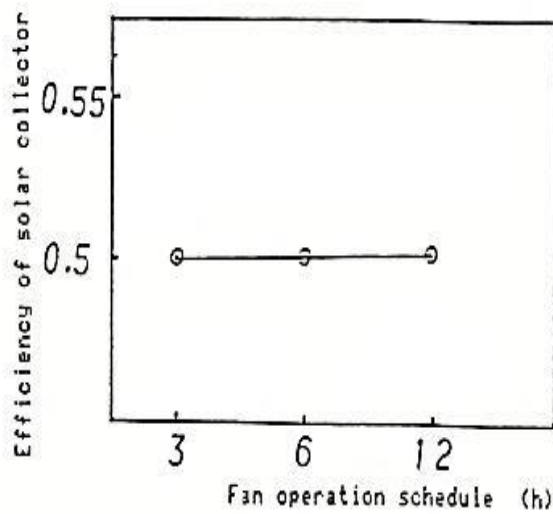


Fig.5 Effect of fan operation schedule for Efficiency of solar collector

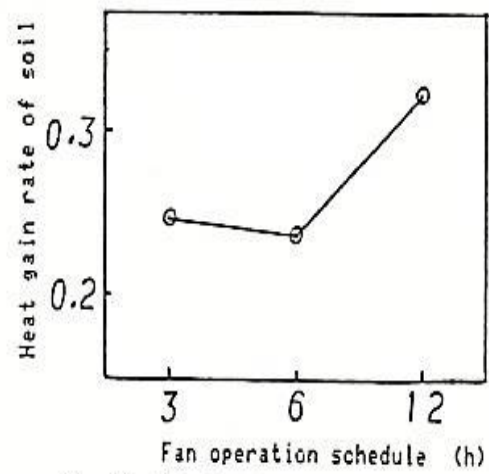


Fig.6 Effect of fan operation schedule for heat gain rate of soil

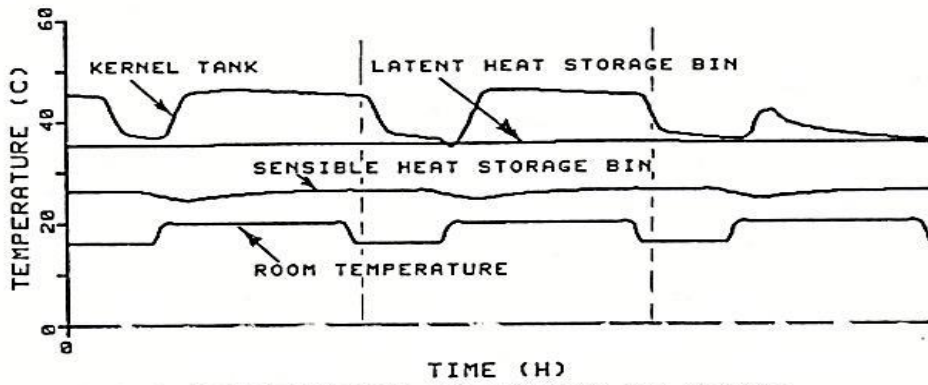


FIG.7 TEMPERATURE VARIATION OF KERNEL TANK,HEAT STORAGE BIN.

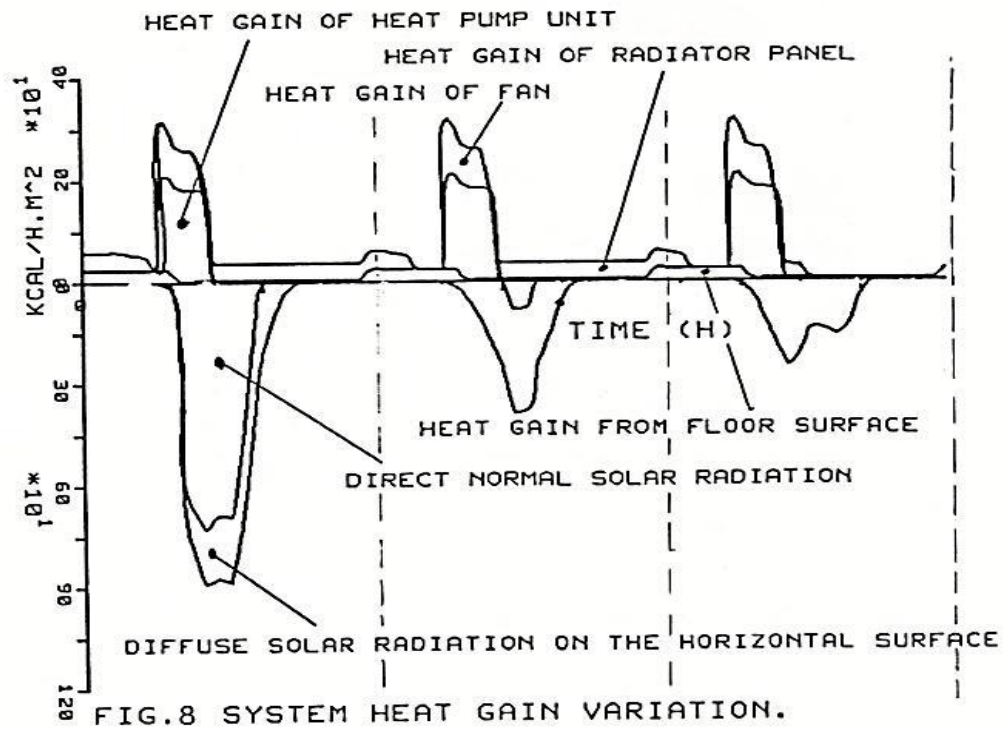


FIG.8 SYSTEM HEAT GAIN VARIATION.

Table 1 Six assumed factors with three fixed levels

FACTORS	level 1	level 2	level 3
A : solar collector area (m ²)	A1= 10	A2= 15	A3= 20
B : P C M weight (kg)	B1= 363	B2= 736	B3= 1100
C : air capacity of fan (m ³ /h)	C1= 150	C2= 250	C3= 350
D : scheduled fan operation time (h)	D1= 3 8 - 11	D2= 6 8 - 11& 14- 17	D3= 12 7 - 19
E : scheduled heat pump operation time (h)	E1= 4 8 - 12	E2= 8 8 - 16	E3= 16 4 - 20
F : scheduled radiator panel operation time (h)	F1= 6 8 - 11& 14- 17	F2= 12 6 - 18	F3= 24

Table 2. Specification of phase change materials

Items \ Type	Type	High temperature PCM	Medium temperature PCM
Phase change temperature range (°C)		45 - 47	35 - 37
Latent heat (kcal/kg)		32. 0	45. 6
Empty space factor among PCM fill (%)		48. 0	48. 0
Storage heat amount (kcal) (20°C difference degree)		21. 27	26. 1
Specific heat (kcal/kg · °C)	Solid	0. 42	0. 34
	Liquid	0. 59	0. 53
Density (kg/m ³)	Solid	1600. 0	1700. 0
	Liquid	1520. 0	1530. 0
Thermal conductivity (kcal/m.h.°C)	Solid	0. 58	0. 94
	Liquid	0. 46	0. 46
Material		High density polyethylene	High density polyethylene
Configuration		Encapsulative	Encapsulative

Table 3. Fixed set points for simulation

Items	Set point	
Calculation conditions	Tokyo (Standard weather data)	
Solar collector	Azimuth angle, Tilted angle	0° , 45°
	Water flow rate	80. 0ℓ/h
	Heat transfer coefficient	6. 0kcal/ m ² .h. °C
Heat pump	Capacity (°C)	1990. 0kcal/h
	Electric consumption (°C)	0. 68kw
	Max. temperature for operation	25. 0°C
Fan	Min. temperature for operation	30. 0°C
Radiator	Min. temperature of hot water for operation	40. 0°C
Soil	Specific heat	0. 64kcal/kg.°C
	Specific weight	1300. 0kg/ m ³
	Heat conduction factor	0. 70kcal/m.h. °C
Operation period	Storage Oct., Nov. Heating Dec.--Mar.	

Table – 5 Analysis of variance factor for COP of system (without pooling error).

I t e m Variance Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	Test Statistic	Remarks
	f	S	V	F0	
A:Solar collector surface area	2.0	0.0587	0.0294	0.020	m ²
B: P.C.M. weight	2.0	0.1554	0.0777	0.052	l
A×B: Interaction	4.0	0.1207	0.0302	0.020	—
C: Pan air capacity	2.0	0.0406	0.0053	0.004	m ³ /h
A×C: Interaction	4.0	0.1649	0.0412	0.028	—
B×C: Interaction	4.0	0.1062	0.0266	0.018	—
D: Fan operation schedule	2.0	8.8861	4.4430	2.987	h
E: H.P operation schedule **	2.0	0.0752	0.0376	0.025	h
F: R.D operation schedule***	2.0	0.2446	0.1223	0.082	h
e: Error	56.0	83.2813	1.4872		—
Total	80.0	93.1036			—

** H.P : Heat pump
*** R.D : Radiator panel

Table – 6 Analysis of variance factor for COP of system (with pooling error).

I t e m Variance Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	Test Statistic	Remarks
	f	S	V	F0	
D: Fan Operation Schedule	2.0	8.8861	4.443	4.115 *	h
e: Error	78.0	84.2176	1.0797		—
Total	80.0	93.1036			—

* One asterisk indicates significance at the 5 percent level.

Table – 7 Analysis of variance factor for COP of heat pump.

I t e m Variance Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	Test Statistic	Remarks
	f	S	V	F0	
D: Fan Operation Schedule	2.0	0.0353	0.0176	3.52 *	h
e: Error	78.0	0.4132	0.005		—
Total	80.0	0.4484			—

* One asterisk indicates significance at the 5 percent level.

Table – 8 Analysis of variance factor for efficiency of solar collector

I t e m Variance Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	Test Statistic	Remarks
	f	S	V	F0	
A:Solar collector surface area	2.0	0.0070	0.0035	1.842	m ²
D: Fan operation schedule	2.0	0.2212	0.1106	58.211 **	h
e: Error	76.0	0.1436	0.0019		—
Total	80.0	0.3717			—

** Two asterisk indicates significance at the 1 percent level.

Table – 9 Analysis of variance factor for heat gain rate of soil.

I t e m Variance Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	Test Statistic	Remarks
	f	S	V	F0	
D: Fan Operation Schedule	2.0	1.4805	0.7402	4.144 *	h
e: Error	78.0	13.9276	0.1786		—
Total	80.0	15.4079			—

* One asterisk indicates significance at the 5 percent level.