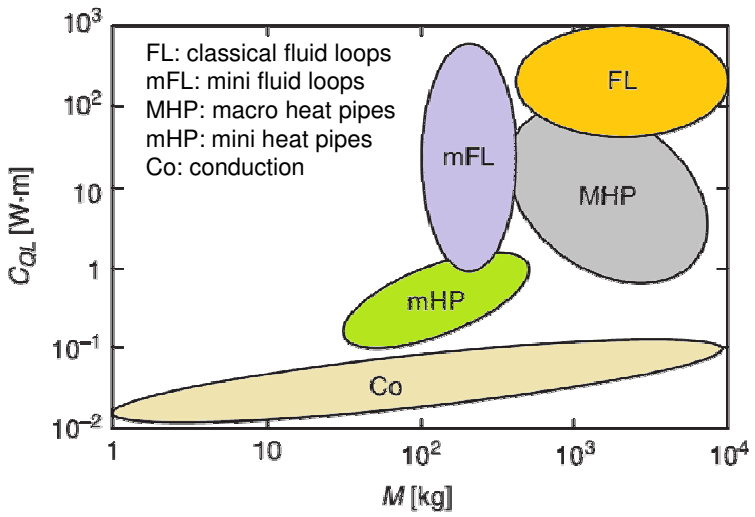
به نام پروردگار یکتا

هیت پایپ

- مقدمه
- ساختار هیت پایپ‌ها
- اصول کارکرد هیت پایپ‌ها
- سیال کاری
- فیتیله‌ها و انواع آن
- محدودیت‌های عملکردی هیت پایپ‌ها
- انواع هیت پایپ‌ها و نسل‌های جدید آنها
- تست هیت پایپ

مقدمه

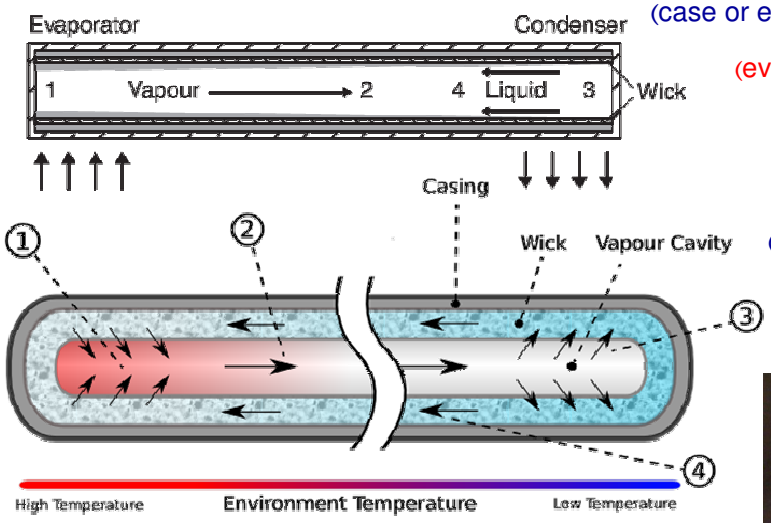
- **تعریف هیت پایپ (Heat Pipe)**
  - یک سیکل دو فازی بسته با تبخیرکننده و چگالنده که مقدار نسبتا زیادی از انرژی حرارتی را از نقطه‌ای به نقطه دیگر منتقل می‌نماید بدون آنکه به انرژی الکتریکی نیازی داشته باشد
- **کاربردهای کلی هیت پایپ**
  - ایجاد سطوح همدما (isothermal surface)
  - تغییر چگالی شار حرارتی (flux density of a heat flow)
  - ابزاری برای کنترل حرارت (thermal control device)



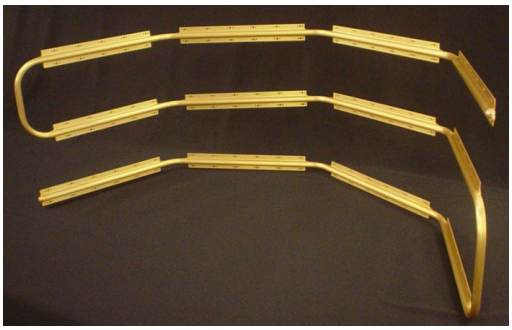
10mm Ø, 1m long heat pipe (50gr):
100W with less than 0.5K gradient
10mm Ø, 1m long copper strap:
3300K gradient!

ساختار هیت پایپ

- اجزاء اصلی و ساختار کلی هیت پایپ
  - غلاف یا محفظه پوششی (case or envelope)
    - بخش تبخیرکننده (evaporator)
    - بخش چگالنده (condenser)
    - بخش آدیاباتیک
  - ساختار فیتیله‌ای (wick structure)
  - سیال کاری (working fluid)



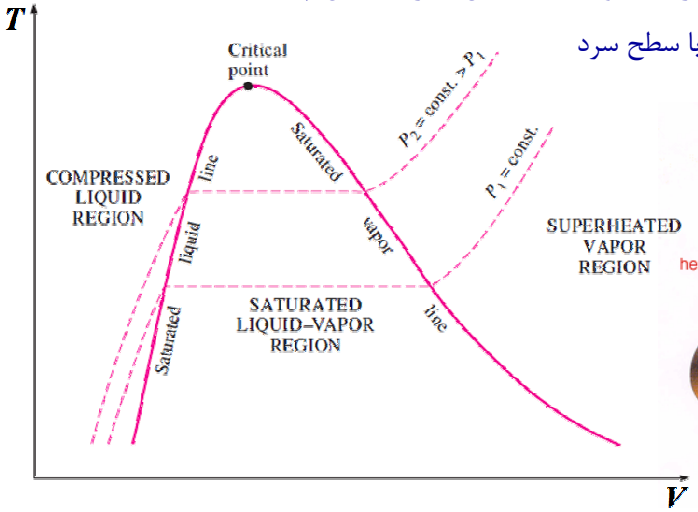
Heat pipe thermal cycle
1) Working fluid evaporates to vapour absorbing thermal energy.
2) Vapour migrates along cavity to lower temperature end.
3) Vapour condenses back to fluid and is absorbed by the wick, releasing thermal energy
4) Working fluid flows back to higher temperature end.

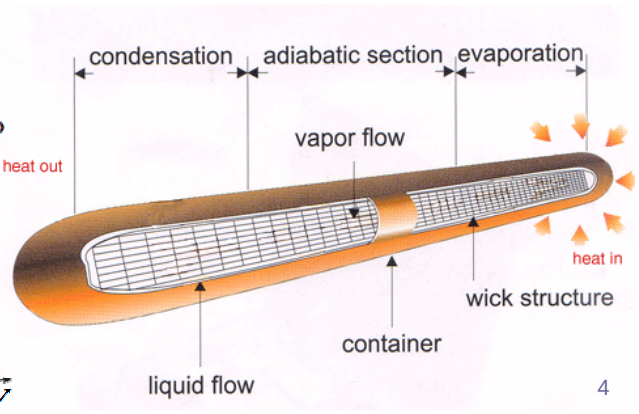


حامد علیصادقی – دانشگاه صنعتی امیرکبیر

اصول کارکرد هیت پایپ

- اصول کارکرد هیت پایپ
  - حالت اشباع مایع داخل فیتیله و بخار موجود در محفظه
  - جذب حرارت در تبخیرکننده، افزایش دما، و تبخیر مایع داخل فیتیله
  - کاهش سطح مایع در فیتیله و افزایش فشار بخار در اثر تبخیر مایع
  - انتقال مایع در بخش چگالنده به بخش تبخیرکننده و متعاقبا انتقال بخار به بخش چگالنده
  - میعان بخار در چگالنده در اثر برخورد بخار با سطح سرد

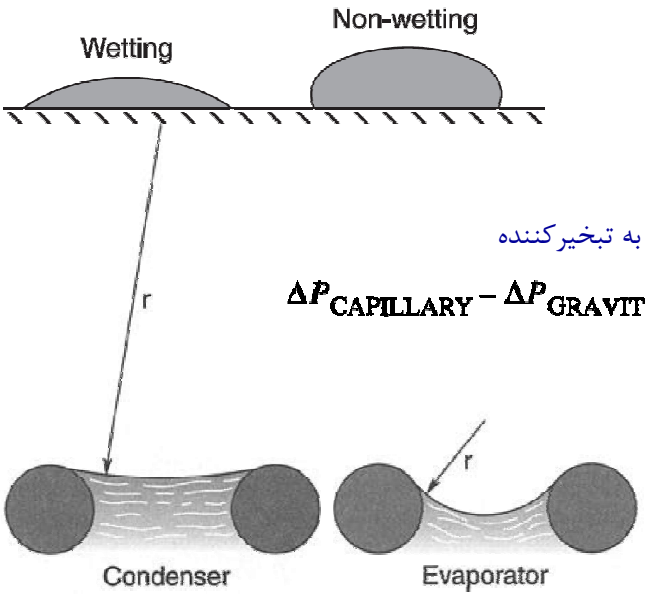




❖ **خاصیت موئینگی (Capillarity)**

- کشش سطحی ملکول‌های مایع (نیروهای بین ملکولی متناسب با انرژی نهان ویژه یا آنتالپی بخار)
- پیوستگی ملکول‌ها در برابر چسبندگی سطحی ملکلول‌ها
  - سیال ترکننده (wetting) φ<90
  - سیال غیرترکننده (Non-wetting) φ>90
- استفاده از سیال ترکننده به عنوان سیال کاری
  - انواع حلال‌ها (solvent)
- خاصیت موئینگی عامل حرکت سیال از چگالنده به تبخیرکننده
- غلبه نیروی موئینگی بر
  - اثر گرانش یا جاذبه
  - افت فشار مایع در اثر لزجت
  - افت فشار بخار در اثر لزجت

$$\frac{free\ surface\ energy}{Unit\ surface\ area} = \sigma_S \text{ surface tension}$$



$$\Delta P_{CAPILLARY} - \Delta P_{GRAVITY} = \Delta P_{LIQUID} + \Delta P_{VAPOR}$$

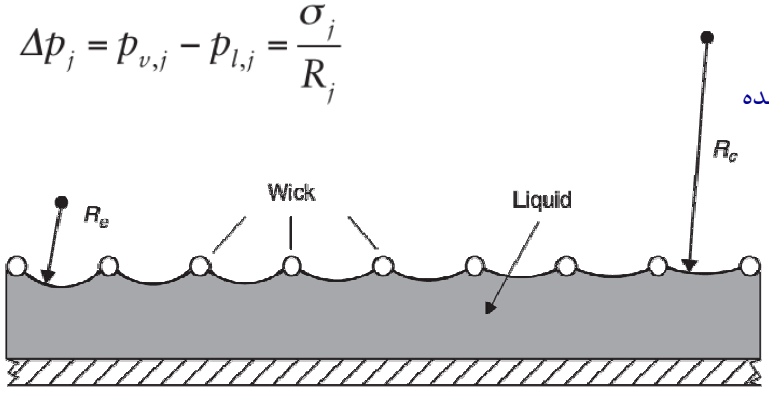
❖ **پمپاژ سیال در اثر خاصیت موئینگی (Capillary Pumping Limit)**

- حالت دوبعدی در یک هیت پایپ
- تبخیر مایع در تبخیرکننده
  - افزایش جهش فشار در اثر افزایش شعاع سطح
  - کاهش فشار مایع
- میعان بخار در چگالنده
  - کاهش جهش فشار در اثر کاهش شعاع سطح
  - افزایش فشار مایع
- حرکت مایع از چگالنده به تبخیرکننده

$$\Delta p = \sigma_S \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

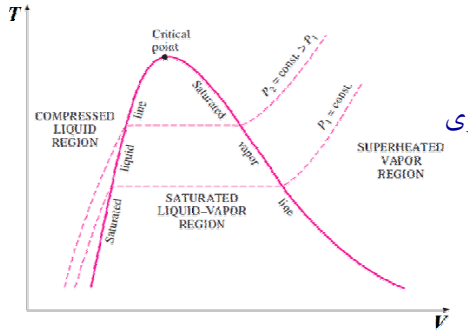
$$R_1 = R_j \text{ and } R_2 \to \infty$$

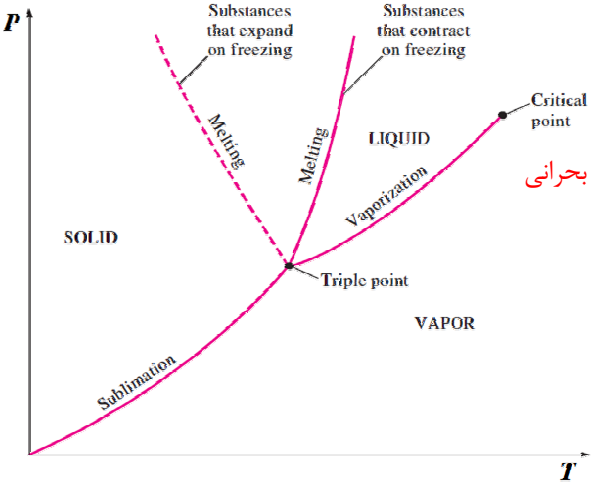
$$\Delta p_j = p_{v,j} - p_{l,j} = \frac{\sigma_j}{R_j}$$



capillarity forces > gravity

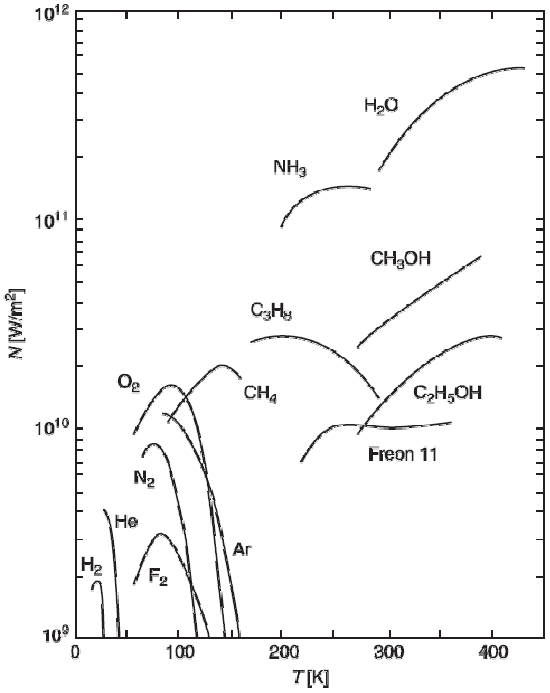
سیال کاری





- ❖ سیال کاری (Working fluid)
  - بکارگیری گستره وسیعی از سیالات از سیالات برودتی تا مایعات فلزی
  - الزامات اصلی در انتخاب سیال کاری
    - سازگاری شیمیایی سیال کاری با محفظه پوششی و فیتیله (chemical compatibility)
    - دمای کارکرد هیت پایپ (desired operating temperature)
    - حد پایین دمای هیت پایپ بالاتر از triple point
    - حد دمای بالای کارکرد هیت پایپ پایین‌تر از نقطه بحرانی

سیال کاری



Note : For each curve, the range of temperature variation is bounded between the largest and smallest operating pressures

- ❖ انتخاب سیال کاری مناسب
  - گرمای نهان تبخیر بالا (latent heat of vaporization)
  - انتقال حرارت هدایتی بالا (thermal conductivity)
  - ویسکوزیته پایین و حداقلی (viscosity)
  - کشش سطحی بالا (surface tension)
  - قابلیت ترکنندگی بالا (wetting ability)
  - نقطه جوش متناسب با دمای عملکرد هیت پایپ
- ❖ مقایسه عملکرد سیالات کاری در بازه‌های دمایی معین
  - پارامتر zero-g figure of merit با واحد (W/m^2)
    - ظرفیت حرارتی

$$N = \frac{\rho_l h_v \sigma_S}{\mu_l}$$

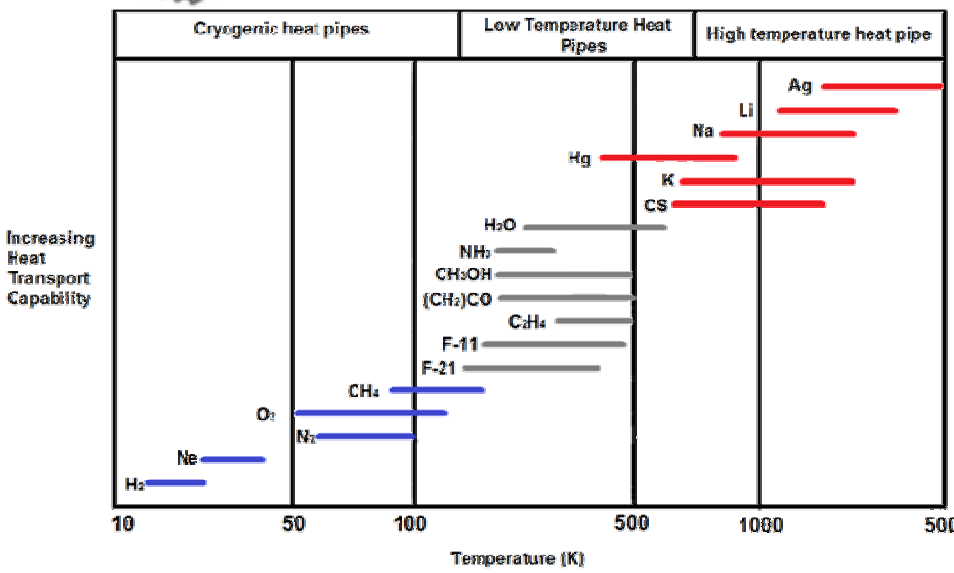
  - پارامتر one-g figure of merit یا (wicking height factor)
    - قدرت پمپاژ در برابرگرانش و اینرسی

$$M = \frac{\sigma_S}{\rho_l}$$

سیال کاری

هیت پایپ

- **بازه دمایی عملکردی انواع سیال‌های کاری**
  - استفاده از آمونیاک در بازه ۲۰۰ الی ۳۰۰ کلوین در کاربردهای فضایی
  - استفاده از آب و متانول با توجه به سازگاری با مس در قطعات الکترونیکی
  - استفاده از فلزات قلیایی برای خنک‌کاری لبه حمله فضاپیماهای ماوراء صوت



سیال کاری

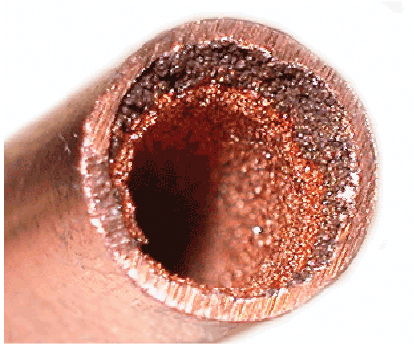
هیت پایپ

Fluid	Melting Point (K)	Melting Point (°F)	Boiling Point (K)	Boiling Point (°F)	Critical Temp. (K)	Critical Temp. (°F)
Hydrogen	14.0	–434.4	20.4	–423.0	33.0	–400.3
Neon	24.5	–415.6	27.1	–410.9	44.4	–379.8
Oxygen	54.3	–361.8	90.2	–297.3	154.8	–181.1
Nitrogen	63.1	–346.0	77.3	–320.4	126.2	–232.4
Ethane	89.9	–297.8	184.5	–127.6	305.5	90.2
Methane	90.7	–296.4	111.4	–259.2	190.5	–116.8
Methanol	175.2	–144.3	337.9	148.5	513.2	464.1
Acetone	180.0	–135.7	329.4	133.2	508.2	455.1
Ammonia	195.5	–107.8	239.8	–28.0	405.6	270.4
Water	273.2	32.0	373.2	212.0	647.3	705.4
Potassium	336.4	145.8	1032.2	1398.3	2250.0	3590.0
Sodium	371.0	208.1	1152.2	1614.3	2500.0	4040.0
Lithium	453.7	357.0	1615.0	2447.0	3800.0	6380.0

Data from Brennan and Kroliczek, Heat Pipe Design Handbook

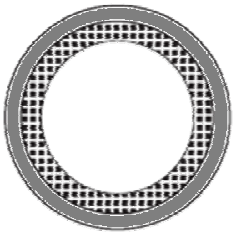
فتیله‌ها

- **فتیله‌ها و ساختارهای آنها (wicks)**
  - غلبه نیروهای تولید شده توسط کشش سطحی سیال و ساختار فتیله‌ای بر ویسکوزیته و افت فشار ناشی از آن در دیواره‌های هیت پایپ
  - ترکیبی از المان‌های کوچک مانند ذرات (particles)، فیبرها و رشته‌ها (fibers)، و تورها (screens) و شیارهایی (grooves) در دیواره هیت پایپ
- **خواص مکانیکی مورد نیاز در فتیله‌ها**
  - پایداری مکانیکی فتیله و عدم تغییر خواص آن در اثر خمش و کشش
  - سازگاری فتیله با سیال کاری انتخاب شده
  - انتخاب نوع و ساختار مناسب فتیله با توجه به کاربرد هیت پایپ
    - ساختار متخلخل درشت، کاهش میزان افت فشار در جریان سیال
    - ساختار متخلخل ریز، افزایش خاصیت موئینگی و توان پمپاژ

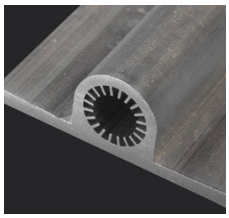


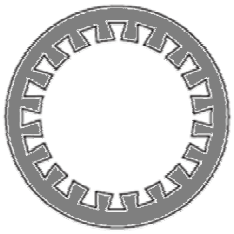
انواع فتیله‌ها

- **انواع فتیله‌ها و ساختارهای آنها (wicks)**
  - فتیله‌های متخلخل (Porous wicks)
    - ساده‌ترین نوع فتیله متشکل از چند پرده توری شکل
  - فتیله‌های شیاری (Grooved wicks)
    - شیارهای محوری در دیواره آلمینیومی یا استیل زده زنگ و یا مسی
    - قابلیت موئینگی متوسط
    - حساسیت به جاذبه در تست‌های زمینی
    - استفاده از اشکال مختلف برای کاهش افت فشار سیال و افزایش خاصیت موئینگی

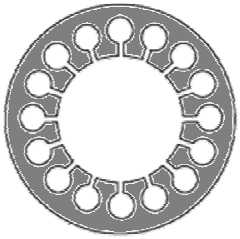


classic porous wick

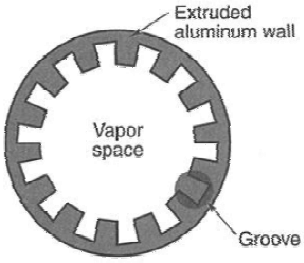


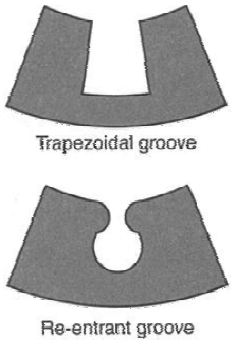


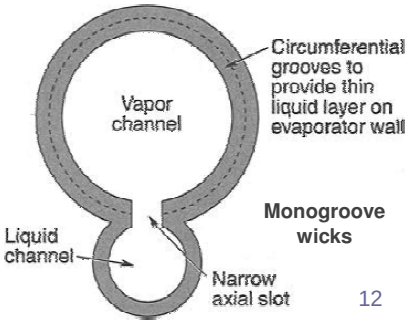
trapezoidal grooved wicks



Ω-shaped grooved wicks





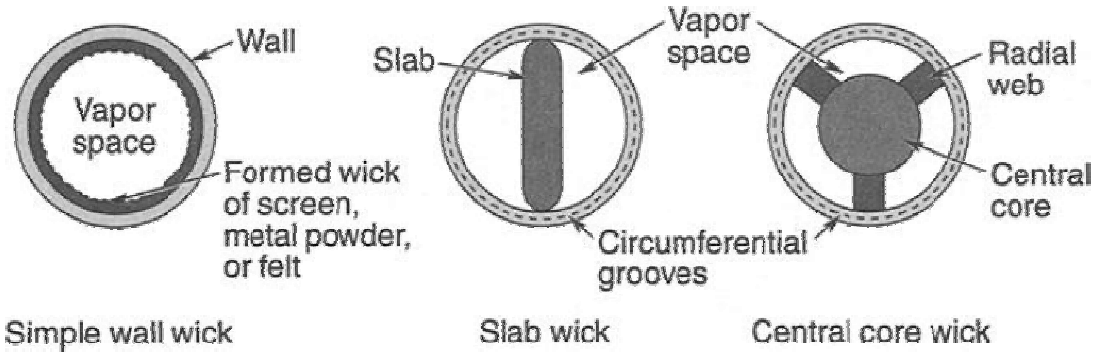


انواع فتیله‌ها

Metal Sintered Powder Wick | **Metal Mesh (felt) Wick** | **Grooved Wick**

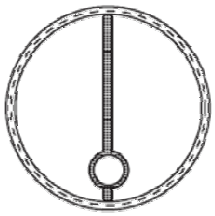
انواع فتیله‌ها

- **انواع فیتیله‌ها و ساختارهای آنها (wicks)**
  - فیتیله‌های ترکیبی (composite wicks)
    - ساختار فیتیله‌ای شامل دو بخش مجزا
    - بخش نخست شامل چند لایه توری در دیواره داخلی هیت پایپ برای توزیع مایع در دیواره تبخیرکننده
    - بخش دوم شامل فیتیله‌هایی تسمه مانند و نواری شکل برای انتقال مایع از چگالنده به تبخیرکننده
    - ظرفیت حرارتی مشابه با ساختار شیاری
    - خاصیت موئینگی بسیار بالاتر، و قابلیت پمپاژ در سطوح شیب‌دار

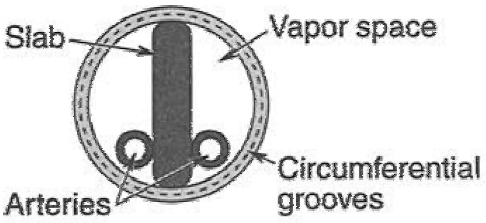


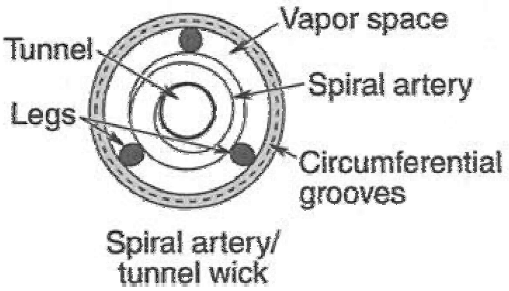
انواع فتیله‌ها

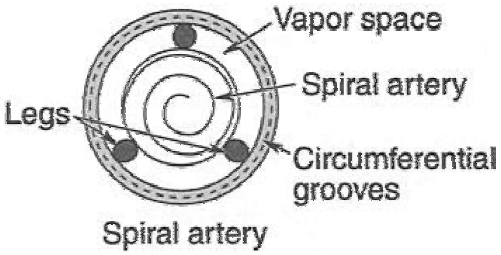
- **انواع فیتیله‌ها و ساختارهای آنها (wicks)**
  - فیتیله‌های شریانی (Arteries)
    - در طبقه‌بندی فیتیله‌های ترکیبی
    - ایجاد مسرهای عبور سیال موازی با فیتیله
    - کاهش افت فشار ناشی از لزجت
    - ظرفیت انتقال حرارت بالا در ابعاد کوچک
    - جلوگیری از تشکیل حباب در شریان

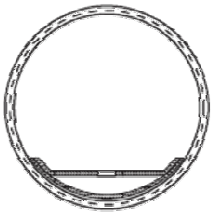


single artery





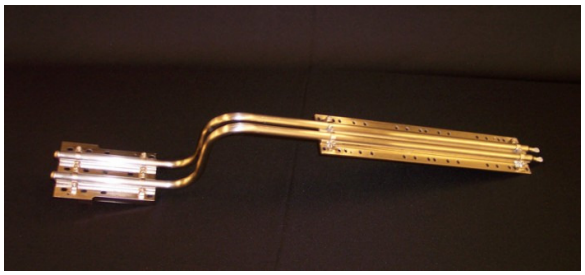


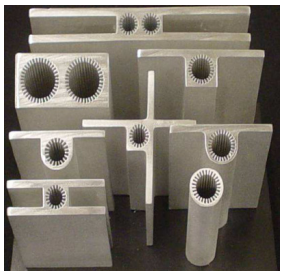


Lateral tunnel

محدودیت‌های عملکردی هیت پایپ

- **تعیین حداکثر نرخ انتقال حرارت توسط هیت پایپ براساس محدودیت‌های عملکردی**
- **محدودیت‌های عملکردی هیت پایپ‌ها**
  - موئینگی (capillarity): مایع با نرخ بسیار بالایی تبدیل به بخار گردد به گونه‌ای که خاصیت موئینگی توان پمپاژ همان میزان مایع را به تبخیرکننده نداشته باشد
  - وابستگی به سرعت صوت (sonic): کاهش چگالی بخار و افزایش همزمان سرعت بخار در اثر افزایش شار حرارتی ورودی، و در نتیجه برابر سرعت بخار با سرعت صوت و خفگی جریان بخار در محفظه هیت پایپ
  - حمل قطرات مایع (entrainment): جریان بخار قطرات مایع را در محل تداخل بخار و مایع از مایع جدا کرده و با خود به چگالنده ببرد
  - جوشیدن تمام مایع (boiling): مایع داخل فیتیله‌ها به جوش آمده و بخار گردند و لایه‌ای از بخار در فیتیله ظاهر گردد

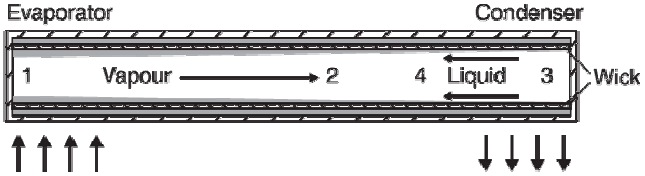




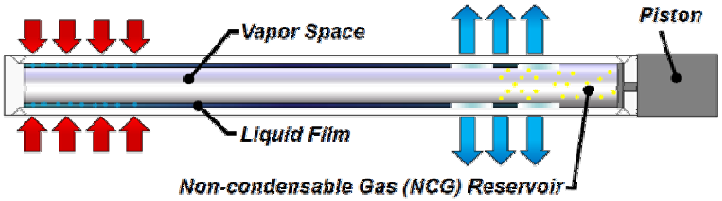
انواع هیت پایپ‌ها

❖ **انواع هیت پایپ‌ها**

- هیت پایپ‌های هدایت ثابت (Constant Conductance Heat Pipe - CCHP)
  - عدم امکان تغییر عملکرد هیت پایپ برای نرخ‌های شار حرارتی متفاوت
  - امکان تغییر جهت کارکرد هیت پایپ



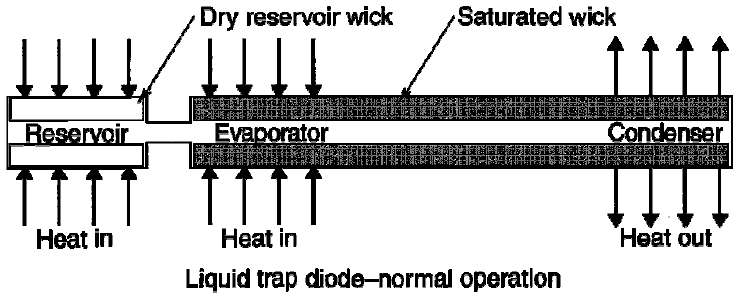
- هیت پایپ‌های دیودی یا یک جهته (Diode Heat Pipe)
  - دیود مایع حبس شده (Liquid-Trap Diode)
  - دیود مایع بلوک‌کننده (Liquid-Blockage Diode)
  - دیود گاز بلوک‌کننده (Gas-Blockage Diode)
- هیت پایپ‌های هدایت متغیر VCHP (Variable Conductance Heat Pipe)
  - capillary pumped loop
  - loop heat pipe



انواع هیت پایپ‌ها

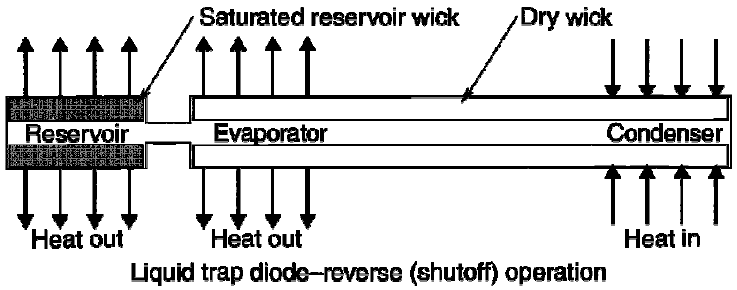
❖ **هیت پایپ‌های دیودی مایع حبس شده (Liquid-Trap Diode)**

- انتقال حرارت بالا در یک جهت
- انتقال حرارت پایین در جهت مخالف
- فیتیله مجزای مخزن از سایر بخش‌ها
- اتصال مخزن به تبخیرکننده
- حالت نرمال
  - مخزن حاوی فیتیله خالی از سیال
  - عملکردی مشابه CCHP



Liquid trap diode–normal operation

- حالت معکوس
  - حبس شدن مقدار زیادی از سیال کاری در مخزن
  - خشک شدن فیتیله هیت پایپ
  - نبود سیال برای انتقال حرارت

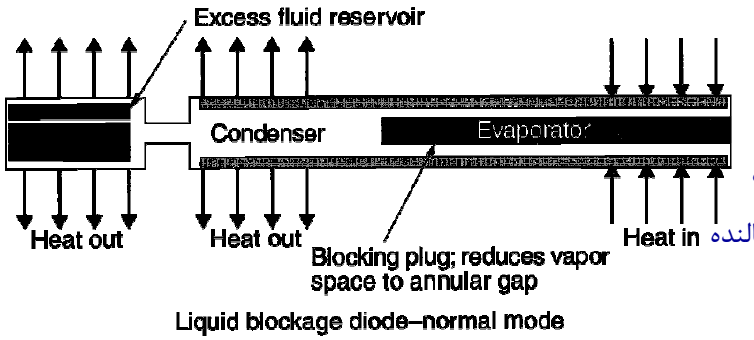


Liquid trap diode–reverse (shutoff) operation

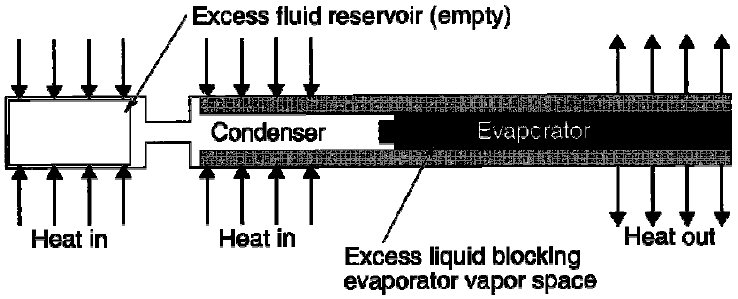
انواع هیت پایپ‌ها

❖ هیت پایپ‌های دیودی مایع بلوک‌کننده (Liquid-Blockage Diode)

- انتقال حرارت بالا در یک جهت
- انتقال حرارت پایین در جهت مخالف
- دارای مخزنی کاملا پوشیده از فیتیله
- عدم اتصال فیتیله مخزن و هیت پایپ
- سرد شدن مخزن با محیط مشابه چگالنده
- حالت نرمال
  - مخزن پر از سیال
- حالت معکوس
  - انتقال سیال مخزن به بخش تبخیرکننده (در حالت نرمال)
  - پرشدن تبخیرکننده مانع از میعان بخار وارد شدن به آن



Liquid blockage diode–normal mode

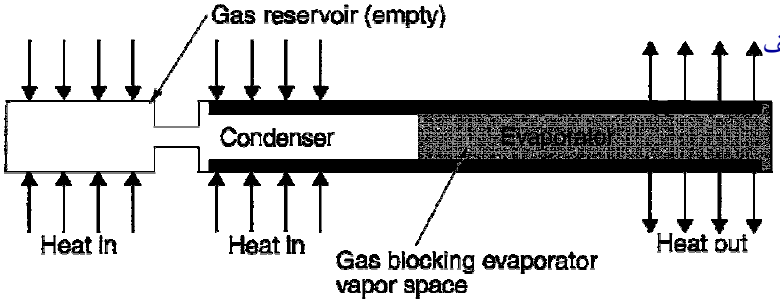


Liquid blockage diode–reverse mode

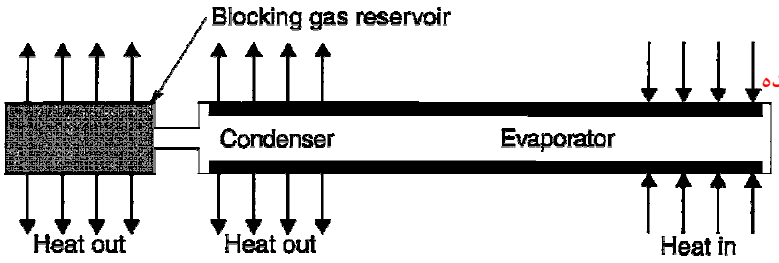
انواع هیت پایپ‌ها

❖ هیت پایپ‌های دیودی گاز بلوک‌کننده (Gas-Blockage Diode)

- انتقال حرارت بالا در یک جهت
- انتقال حرارت پایین در جهت مخالف
- مخزنی بدون فیتیله
- مخزن متصل به بخش چگالنده
- مخزن حاوی گازی غیرقابل میعان
- حالت نرمال
  - مخزن پر از گاز غیرقابل میعان
- حالت معکوس
  - انتقال گاز مخزن به تبخیرکننده
  - پرشدن تبخیرکننده از گاز
  - عدم امکان میعان بخار سیال کاری در تبخیرکننده



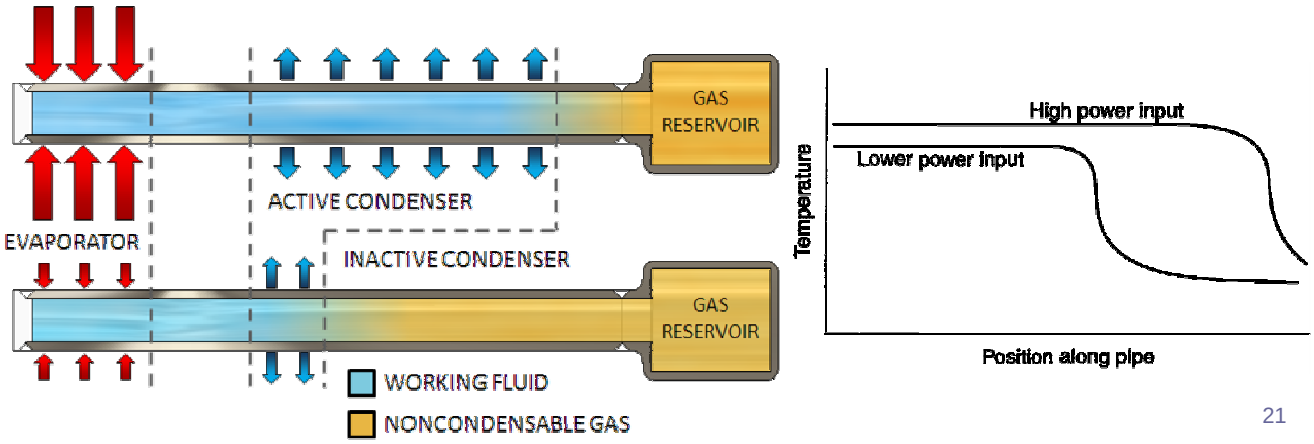
Gas blockage diode–reverse mode



Gas blockage diode–normal mode

انواع هیت پایپ‌ها

- هیت پایپ‌های هدایت متغیر (Variable Conductance Heat Pipe - VCHP)
  - مخزنی متصل به چگالنده حاوی گاز غیرقابل میعان
  - کنترل ناحیه چگالنده با استفاده از گاز مخزن بر اساس دمای بخش تبخیرکننده
  - کاربرد: کنترل سطح فعال رادیاتور متناسب با میزان اتلافات حرارتی بخش‌های الکترونیکی
  - استفاده از پیستون شناور برای جلوگیری از عدم اختلات دو گاز کنترلی و بخار سیال کاری
  - استفاده از گرمکن در مخزن گاز کنترلی و سیستم داده‌برداری دمایی برای سیستم‌های فعال



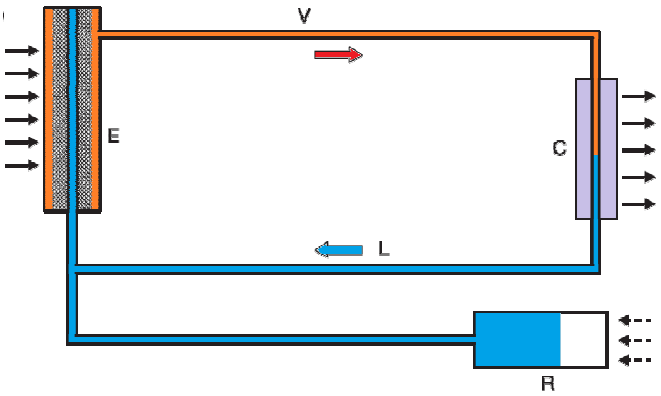
نسل جدید هیت پایپ‌ها

- نسل‌های جدید هیت پایپ‌ها
  - عدم امکان انتقال حرارت در فواصل طولانی برای هیت پایپ‌های متداول توسعه یافته و قابل اعتماد
    - اجبار در تعبیه سیستم‌های دارای اتلافات حرارتی بالا در مجاورت رادیاتورها
    - افزایش وزن و سازه‌های نگهدارنده اجزا در مجاورت رادیاتورها
    - عدم امکان کنترل دقیق دما
    - افزایش میزان انتقال حرارت با روند روبه رشد اتلافات اجزای ماهواره‌ها
  - توسعه هیت پایپ‌های نسل جدید
    - هیت پایپ‌های CPL (capillary pumped loop) طراحی و ساخته شده توسط کشورهای غربی
    - هیت پایپ‌های LHP (loop heat pipe) طراحی و ساخته شده توسط روسیه
  - افزایش کارآیی هیت پایپ‌های نسل جدید تا two order of magnitude نسبت به نسل‌های قبلی
  - انتقال سریع انرژی حرارتی از سطح گرم به سطح سرد از طریق خطوط انعطاف‌پذیر و کوچک
  - قرارگیری در زمره سیستم‌های کنترل حرارت غیرفعال با توجه به عدم وجود قسمت مکانیکی متحرک و ایجاد ارتعاشات ناخواسته در فضاپیما

هیت پایپ

نسل جدیدیت پایپ‌ها

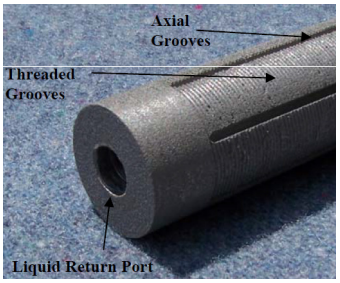
- **هیت پایپ‌های CPL (capillary pumped loop)**
  - معرفی شده توسط NASA در سال 1966 میلادی
  - اولین تست پروازی موفق ۱۹۹۵ میلادی (CAPL-2)
  - استفاده از ساختار فیتیله‌ای پلی‌اتیلنی در تبخیرکننده و عدم استفاده از ساختار فیتیله‌ای در سایر بخش‌ها
  - استفاده از یک مخزن انباشت‌کننده (hydro-accumulator reservoir) برای کنترل دمای اشباع سیستم و گردش کامل سیال (fluid circulation)
  - عملکرد مناسب در دمای پایین (cold-biased) و کنترل دقیق دما تا ±0.5°C
  - تعبیه گرمکنی با توان حدود ۱۵ وات در مخزن برای کنترل دمای عملکردی لوپ و آماده سازی سیستم در شروع به کار (start-up)

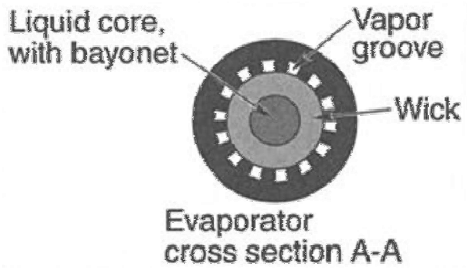


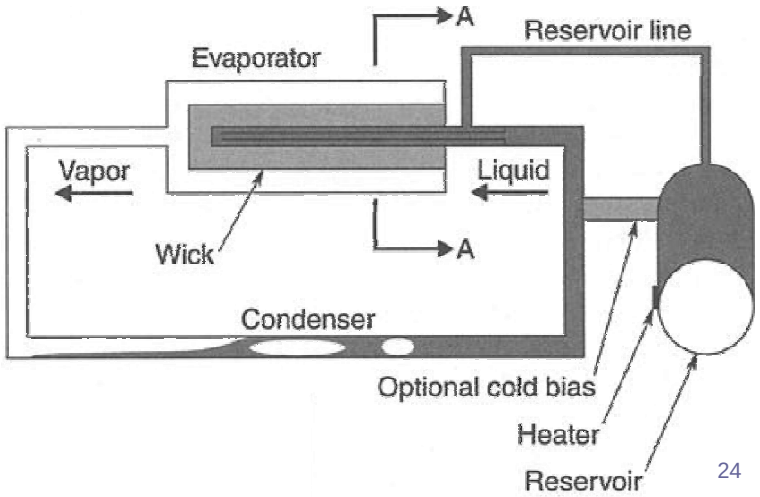
هیت پایپ

نسل جدیدیت پایپ‌ها

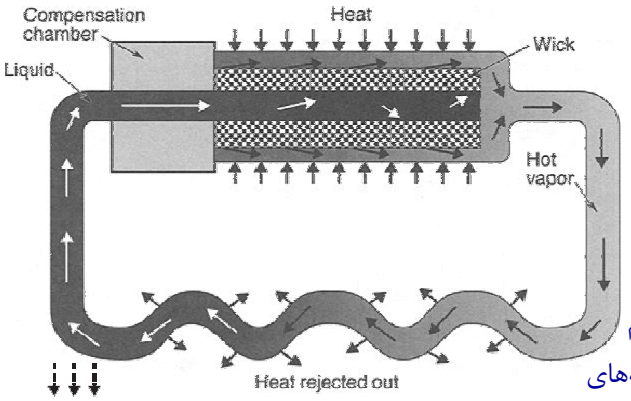
- **هیت پایپ‌های CPL (capillary pumped loop)**
  - روشن شدن گرمکن مخزن مایع
  - پمپاژ مایع داخل مخزن در اثر گرمای گرمکن به داخل فیتیله تبخیرکننده
  - جلوگیری از تبخیر مایع در داخل هسته مرکزی فیتیله تبخیرکننده (تشکیل حباب مانع از انتقال سیال به فیتیله تبخیرکننده شده، فیتیله تبخیرکننده خشک می‌گردد)

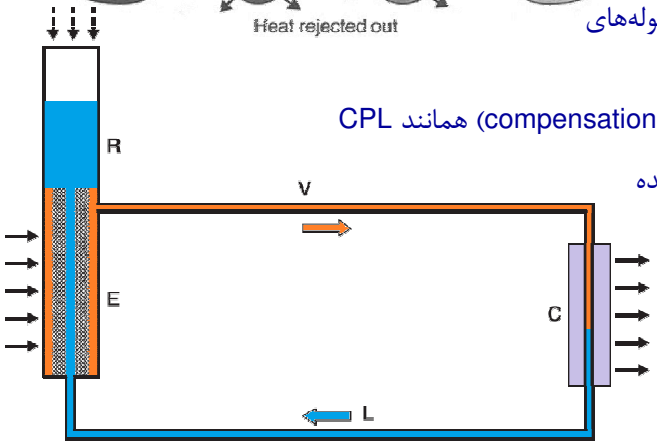






نسل جدیدتر پایپ‌ها



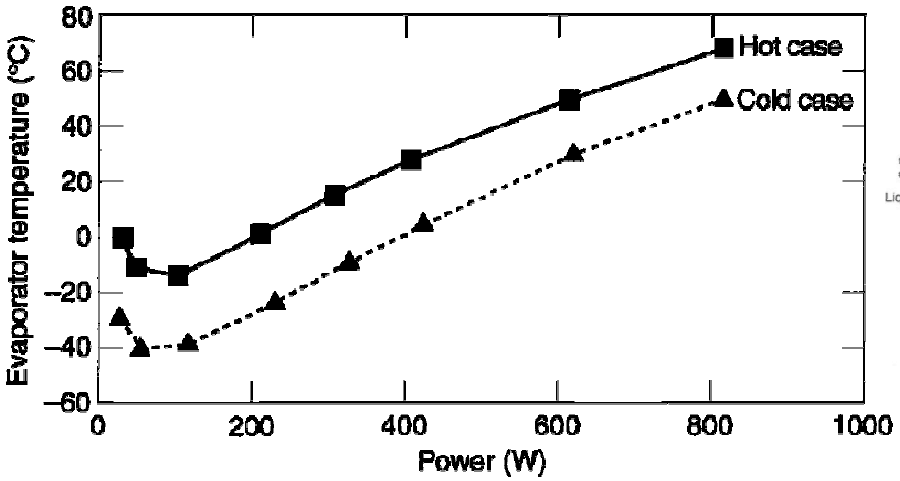


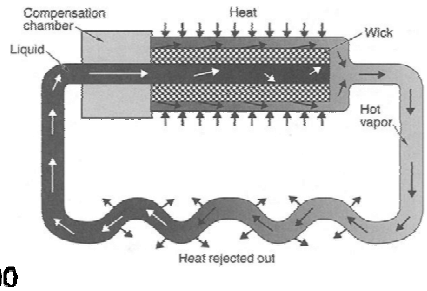
- ❖ هیت پایپ‌های LHP (loop heat pipe)
  - نخستین تست در سال‌های دهه ۱۹۸۰ میلادی توسط اتحاد جماهیر شوروی
  - ظرفیت حرارتی بالا مشابه با CPL
  - استفاده از ساختار فیتیله‌ای Sintered powder metallic در تبخیرکننده در نمونه‌های اولیه و عدم استفاده از ساختار فیتیله‌ای در سایر بخش‌ها و لوله‌های انتقال سیال
  - استفاده از یک مخزن جبران‌کننده (compensation chamber) همانند CPL
  - اتصال مستقیم مخزن جبران‌کننده به تبخیرکننده و امکان انتقال حرارت تبخیرکننده به مخزن
  - استفاده از ساختار فیتیله‌ای ثانویه برای اتصال مخزن جبران‌کننده به تبخیرکننده

نسل جدیدتر پایپ‌ها

- ❖ هیت پایپ‌های LHP (loop heat pipe)
  - نمودار عملکردی (دمای تبخیرکننده بر حسب توان) یک نمونه هیت پایپ LHP متداول
  - تغییر دمای تبخیرکننده با توجه به تغییر دمای رادیاتور

Typical performance curves of an LHP hot case (Tsink - 233 K) and cold case (Tsink = 153 K).

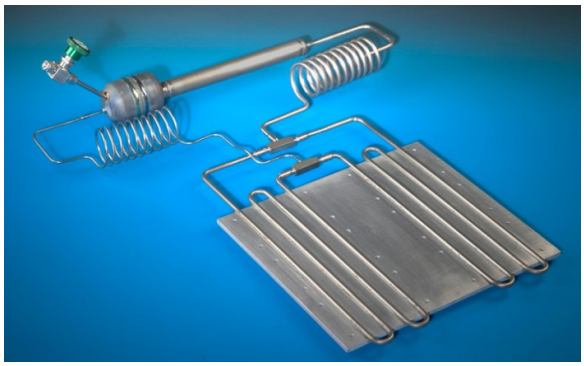




نسل جدید هیت پایپ‌ها

❖ **تفاوت‌ها و ویژگی‌های CPL و LHP**

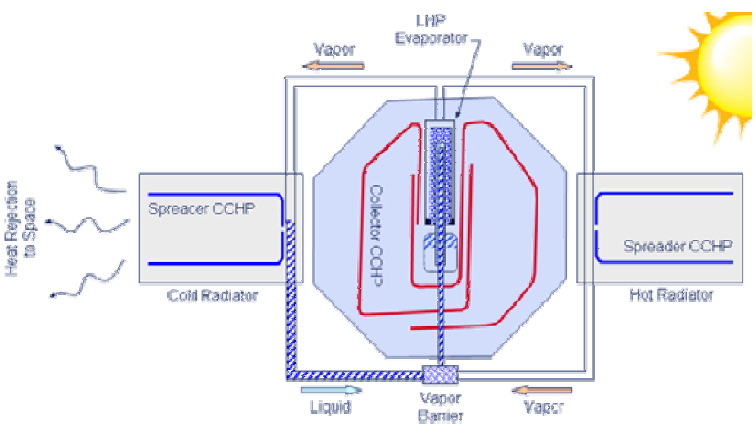
- قابلیت بیشتر سیستم LHP نسبت به CPL با توجه به امکان کارکرد LHP با وجود حباب در تبخیرکننده
- توقف کارکرد CPL در هنگام تشکیل حباب در داخل تبخیرکننده
- قابلیت LHP برای تطبیق دمای کارکردی برای از بین بردن حباب‌های تشکیل شده در تبخیرکننده
- عدم نیاز LHP به راه‌اندازی اولیه همانند CPL و امکان راه‌اندازی خودکار با اضافه شدن گرما به تبخیرکننده
- امکان روشن و خاموش نمودن متعدد برای سیستم LHP
- ساخت و اسمبلی و جایگذاری دشوارتر LHP در سازه ماهواره نسبت به CPL با توجه به حجم بزرگ‌تر مخزن جبران‌کننده آن و اتصال آن به تبخیرکننده
- قابلیت کنترل دمای قطعات الکترونیکی در بازه‌ای بسیار کوچک با استفاده از CPL
- امکان بروز نوسانات دمایی در سیستم LHP

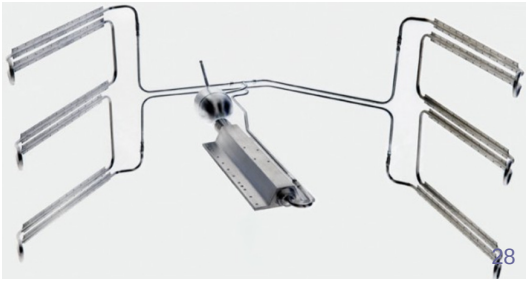


تست هیت پایپ‌ها

❖ **بررسی عملکرد و تست یک نمونه هیت پایپ LHP ماهواره TacSat-4**

- ماهواره TacSat-4 یک میکرو ماهواره با هیت پایپی از نوع LHP آلمینیومی با سیال کاری آمونیاک برای انتقال ۷۰۰ وات انرژی حرارتی اتلاف شده توسط قطعات الکترونیکی به دو سطح رادیاتور
- تست عملکردی هیت پایپ در شرایط عملیاتی
  - شروع کار (start-up)
  - شرایط عدم تعادل حرارتی چگالنده‌ها (un-balanced condenser heat removal)
  - توان گذرا (transient power)
  - توان بالا (high power)
  - خاموش (shut down)



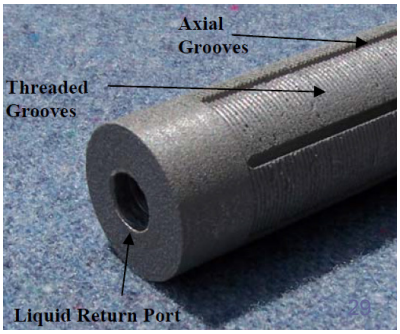


❖ الزامات طراحی هیت پایپ ماهواره TacSat-4

Parameter/Description	Quantity/Magnitude
Operating Temperature	-20 to +50°C
Survival Temperature	-70 to +80°C
Working Fluid	High Purity Ammonia
Heat Transport Capability	5 to 700 Watts
Effective Thermal Conductance (Pump)	≥120 W/K at 500 Watts
Overall LHP Conductance	≥70 W/K; 200 to 700 Watts
Capillary Pump Length	30.5 cm (12 inches)
Primary Wick Material	Sintered Nickel Powder
Primary Wick Pore Size	≤ 1.5 μm
Primary Wick Permeability	≥ 1.0 x 10^{-14} m^2
Primary Wick Thermal Conductivity	≤ 10 W/m-K
Primary Wick Outer Diameter	2.54 cm (1 inch)
Secondary Wick Static Height Capability	≥ 1.6 cm (0.63 inches)
Secondary Wick Transport Capability	≥ 30.5 W-m (1200 W-in)
Secondary Wick Material	Stainless Steel Screen Composite
Condenser Geometry	Two (2) Parallel Paths
Capillary Flow Balancer Vapor Hold Off	≥ 1000Pa
Capillary Flow Balancer Liquid Delta P	≤ 1000 Pa at 0.7 grams/sec flow
Capillary Pump Material	6063 Aluminum
Compensation Chamber Material	316 Stainless Steel
Transport Line Material	316 Stainless Steel
Condenser Section Material	6063 Aluminum Extrusion

LHP Primary Wick

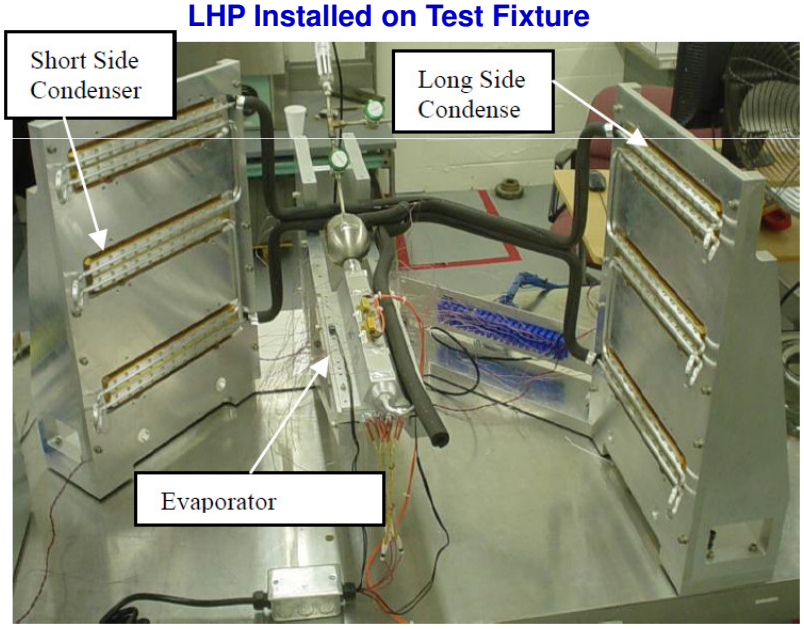
Titanium LHP evaporator wick



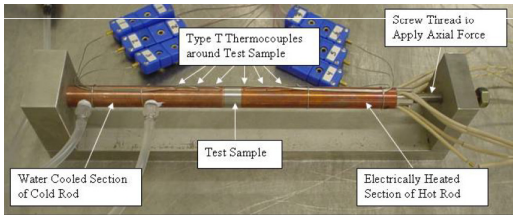
❖ تست عملکرد هیت پایپ LHP ماهواره TacSat-4

- نحوه نصب هیت پایپ در تست عملکردی
- نحوه نصب و تست عملکرد فیتیله ثانویه
- نحوه تست ضریب هدایت فیتیله

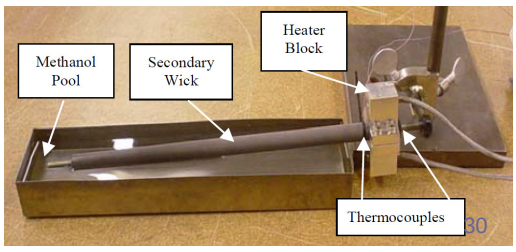
LHP Installed on Test Fixture



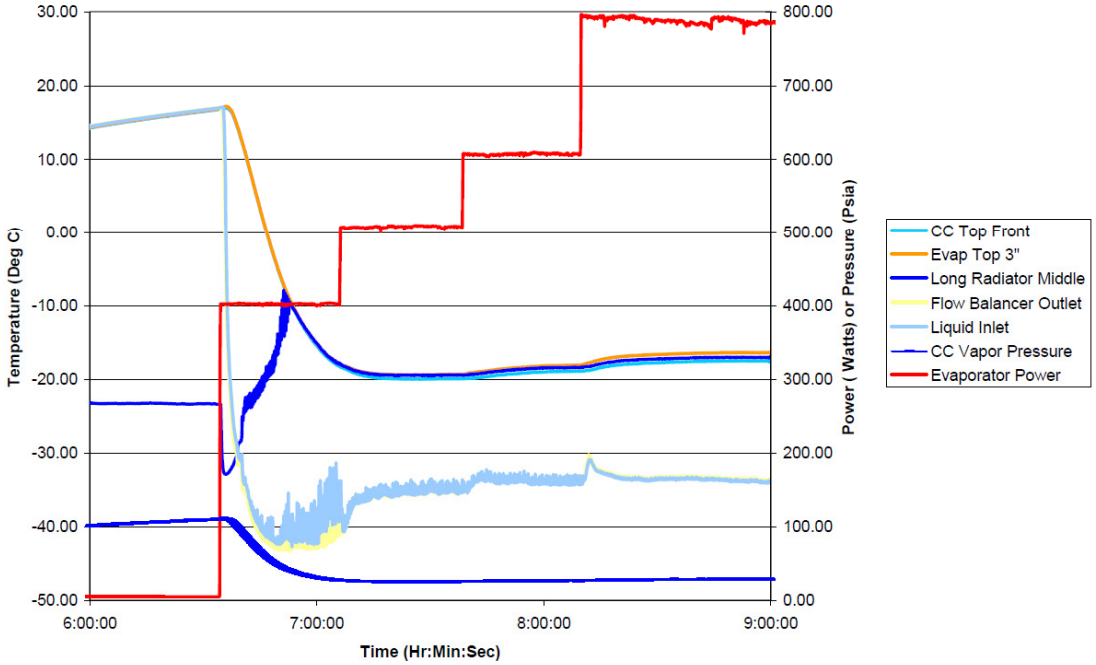
Wick Thermal Conductivity Test Fixture



Secondary Wick Performance Testing



❖ یک نمونه از نتایج تست عملکرد هیت پایپ LHP ماهواره TacSat-4



High Power Testing - 400 Watt Start Followed by 100 Watt Increases up to 800 Watts

❖ تست غیرفعال هیت پایپ LHP

- کاربرد در یک ماه نشین (Lunar Lander)