การตรวจเอกสาร

1. ฟ้าทะลายโจร

ฟ้าทะลายโจรเป็นสมุนไพรที่ใช้อย่างกว้างขวางในการแพทย์แผนโบราณของจีน โดยใช้เป็นยาแก้ไข้ แก้อาการอักเสบ และแก้ท้องเสีย (ศูนย์ข้อมูลสมุนไพร, 2529) ในตำรายาของประเทศจีนได้มีการกล่าวถึงสรรพคุณในการใช้รักษาโรคหวัดและในบางประเทศในทวีปยุโรปและอเมริกาใต้มีการใช้สมุนไพรนี้บรรเทาอาการไข้ เจ็บคอในผู้ป่วยโรคหวัดเช่นเดียวกัน เนื่องจากโรคหวัดและโรคท้องเสียเป็นโรคที่พบบ่อย ประเทศต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการซื้อยาจากต่างประเทศเพื่อแก้ปัญหาสาธารณสุขนี้ปีละไม่ใช่น้อย ด้วยเหตุนี้กระทรวงสาธารณสุขจึงได้มีการส่งเสริมการศึกษาวิจัย เพื่อนำสมุนไพรนี้มาพัฒนาใช้เป็นยาในรูปแบบแผนปัจจุบันและการเตรียมใช้เองในการสาธารณสุขมูลฐาน(ทวีพล และคณะ, 2542)

ฟ้าทะลายโจรมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Andrographis paniculata (Burm.f.) Nees* อยู่ในวงศ์ Acanthaceae และมีชื่อสามัยซึ่งแตกต่างกันไปตามแต่ละท้องถิ่น เช่น ฟ้าทะลายโจร ; ฟ้าทะลาย (กทม) ; หญ้ากันงู (สงขลา) ; น้ำลายพังพอน (กลาง) ; ฟ้าสาง (พนัสนิคม) ; เขยตายยายคลุม (โพธาราม) ; สามสิบดี (ร้อยเอ็ด) ; เมฆทะลาย (ยะลา) ; ฟ้าสะท้าน (พัทลุง) ; ซีปังกี ; คีปังฮี ; ชวงซิมน้อย ; เจ็กเกี้ยงฮี่ ; โข่งเช่า ซิปังกี่ (จีน) ; the creat, creyat root, halviva, kariysat, green chiretta, kreat ฟ้าทะลายโจรมีรสขมมากจนได้สมญาว่าจ้าวแห่งความขม (King of bitters)

1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

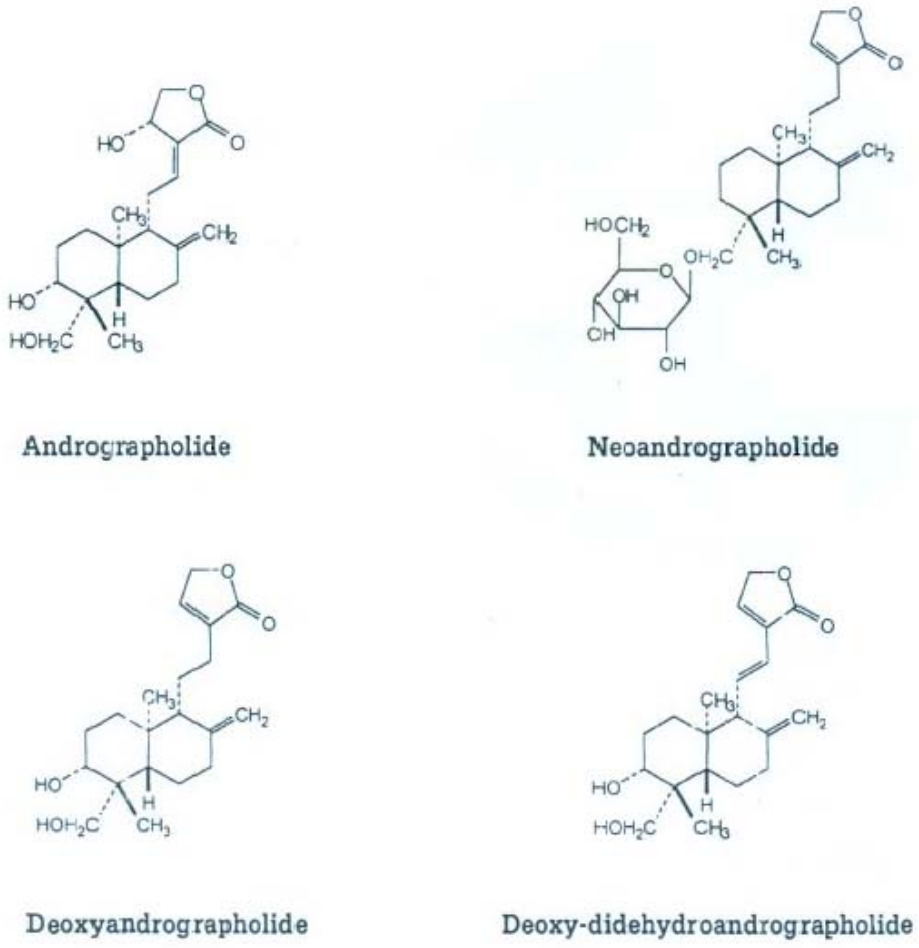
ฟ้าทะลายโจรเป็นพืชล้มลุกตระกูลเดียวกับต้นกระเพราหรือโหระพา สามารถปลูกได้ดีในภูมิภาคที่มีอากาศร้อน หรือร้อนชื้น สามารถปลูกได้ทุกฤดูกาลและขึ้นได้ในดินทุกชนิด แต่จะเจริญเติบโตได้ดีในดินร่วนซุยและระบายน้ำได้ดี ลำต้นมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม สูงประมาณ 30-100 เซนติเมตร ใบเดี่ยวออกตรงข้ามสลับตั้งฉากกับคู่ถัดไป แผ่นใบเป็นรูปยาวรี กว้าง 1-4 เซนติเมตร ยาว 2-12 เซนติเมตร โคนใบและปลายใบเรียวแหลม ผิวด้านบนสีเข้มกว่าด้านล่างใบ มีเส้นใบข้างละ 5-7 เส้น ก้านใบยาว 3-10 มิลลิเมตร ลักษณะดอกเป็นช่อ ช่อดอกจะออกที่ยอดหรือที่ง่ามใบใกล้ยอด ช่อโปรงยาว 5-30 เซนติเมตร กลีบเลี้ยงมีสีเขียวยาวประมาณ 3-4 มิลลิเมตร ปลายเรียวแหลม มีขน แยกเป็น 5 กลีบ ส่วนโคนเชื่อมติดกัน กลีบดอกสีขาว ส่วนโคนเชื่อม ติดกันเป็นหลอด ส่วนปลายแยกเป็นพูใหญ่ 2 พู พูบนมี ขนาดใหญ่กว่าพูล่าง และขอบของพูบนแยกเป็นแฉกเล็ก ๆ 3 แฉก

ด้านในของพูนี้เห็นเป็นจุดเล็ก ๆ สีม่วงแดง ส่วนขอบของพูล่างแยกเป็นแฉกเล็ก ๆ 2 แฉก เกสรตัวผู้มี 2 อัน เชื่อมติดกับหลอดของกลีบดอก อับเรณูสีม่วงดำเชื่อมติดกัน ส่วนก้านชู-อับเรณูมีสีขาวอยู่แยกกันและมีขนสั้น ๆ เกสรตัวเมียมี 1 อัน รังไข่มีตำแหน่งอยู่เหนือจุดติดของกลีบเลี้ยงบนฐานรองดอก รังไข่มี 2 ห้อง แต่ละห้องมีไข่อ่อนมาก ไข่อ่อนติดที่แกนกลางของรังไข่ ลักษณะผลเป็นผลแห้ง ทรงกระบอก คล้ายฝักต้อยติ่ง เวลาแก่จะมีสีน้ำตาลและแตกออกจะมีเมล็ดเล็กๆนำไปขยายพันธุ์ได้ (ภาพที่ 1)

ภาพที่ 1 ลักษณะลำต้นและใบของฟ้าทะลายโจร

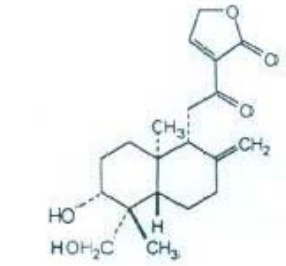
1.2 องค์ประกอบทางเคมี

ทุกส่วนของของต้นฟ้าทะลายโจรมีรสชาติขมมาก ส่วนที่ใช้ทำเป็นยา คือ ส่วนเหนือดิน (ใบ ดอก ลำต้น) ส่วนเหนือดิน ประกอบด้วยสารสำคัญประเภทแลคโตนที่มีฤทธิ์ลดไข้ (antipyretic) และฤทธิ์ต้านอักเสบ (anti-inflammation) หลายชนิดเรียงลำดับความสำคัญจากมากไปน้อย ดังนี้ แอนโดรกราโฟไลด์ (andrographolide) นีโอแอนโดรกราโฟไลด์ (neoandrographolide) ดิออกซีแอนโดรกราโฟไลด์ (dioxy andrographolide) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคท้องร่วง และ ดิออกซีไดดี ไฮโดรแอนโดร กราโฟไลด์ (deoxy-didehydroandrographolide) ภาพที่ 2 (ทวีพล และคณะ, 2542)

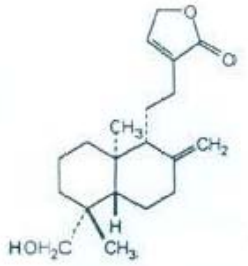


ภาพที่ 2 โครงสร้างของสารออกฤทธิ์ในส่วนเหนือดินของฟ้าทะลายโจร

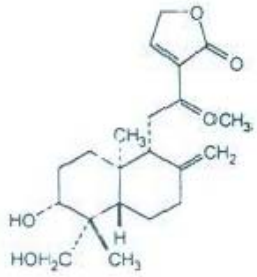
นอกจากนี้ยังพบสารประเภทแลคโตนอื่นๆในปริมาณที่น้อย ได้แก่ ดิออกซีออกโซแอนโดรกราโฟไลด์ (dioxy-oxo- andrographolide) ไดออกซีแอนโดรกราโฟไลด์ (dideoxy-andrographolide) ดีออกซีเมธอกซีแอนโดรกราโฟไลด์ (deoxy-methoxy- andrographolide) แอนโดรกราฟีไซด์ (andrographiside) และ ดิออกซีแอนโดรกราฟีไซด์ (deoxy andrographiside) และสารประเภทฟลาลาโวน(flavone) เช่น โอรอกซิลิน (oroxylin) โวโกนิน (wogonin) และ แอนโดรกราฟีดีน เอ (andrographidine A) ภาพที่ 3



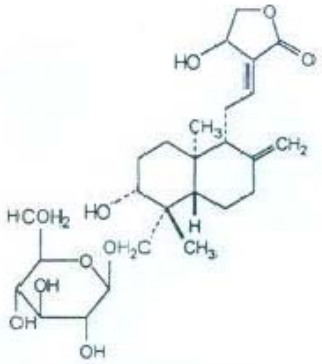
Deoxy-oxo-andrographolide



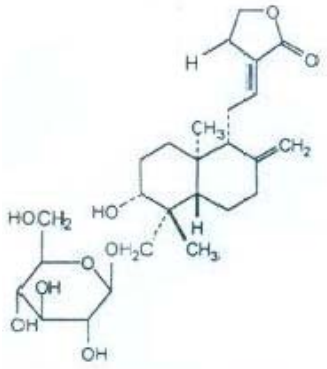
Dideoxy-andrographolide



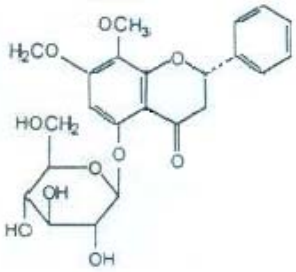
Deoxy-methoxy-andrographolide



Andrographiside



Deoxyandrographiside



Andrographidine A

ภาพที่ 3 สูตรโครงสร้างของสารสำคัญอื่นๆที่พบในส่วนเหนือดินฟ้าทะลายโจร

1.3 การศึกษาทางคลินิกและเภสัชวิทยาของฟ้าทะลายโจร

จากการศึกษาทางคลินิกและเภสัชวิทยาของฟ้าทะลายโจรพบว่า ฟ้าทะลายโจรสามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคท้องร่วง-บิด และอหิวาตกโรคได้ (สุรัชนี และคณะ, 2533) ซึ่งจากการทดลองเปรียบเทียบผลการรักษาของฟ้าทะลายโจรกับยาเตตราซัยคลีน พบว่าฟ้าทะลายโจรลดจำนวนเชื้ออหิวาตกโรคไม่ดีเท่าเตตราซัยคลีน แต่เชื้อบิด-แบคทีเรีย (ชิเกลล่า) กลับลดลงได้ดี

กว่า (ปัญจางค์, 2530) และสารสกัดจากฟ้าทะลายโจรยังสามารถลดการหดเกร็งของกล้ามเนื้อลำไส้ส่วนปลายของหนูตะเภาได้ (กมล และคณะ, 2534) ซึ่งฤทธิ์ในการต้านการหดเกร็งของลำไส้นี้เอง ที่เป็นข้อมูลสนับสนุนการใช้ฟ้าทะลายโจรในการรักษาโรคท้องเสีย และ อุจจาระร่วงอย่างได้ผลดีในทางคลีนิก นอกจากนี้ฟ้าทะลายโจรยังสามารถยับยั้งและลดขนาดแผลในกระเพาะวัสดุที่เกิดจากความเครียด (stress) ในหนูถีบจักรได้ (ศิริมา และคณะ,2532)

ฟ้าทะลายโจรไม่เพียงแต่มีผลในการรักษาโรคที่เกิดกับระบบทางเดินอาหาร แต่ยังมีผลในการรักษาโรคทางเดินหายใจ ลดไข้ และลดอาการอักเสบ (Deng, 1985) แก้การติดเชื้อในระบบทางเดินหายใจส่วนบน ต่อมทอนซิลอักเสบทั้งเรื้อรังและเฉียบพลัน (ชัยโย และคณะ, 2522) เพ็ญนภา (2539) ได้ทำการศึกษาผลทางคลินิกในการใช้สารที่ได้จากการสกัดฟ้าทะลายโจรเพื่อใช้ในการรักษาอาการเจ็บคอในเด็กและผู้ใหญ่พบว่า ฟ้าทะลายโจรสามารถรักษาอาการไข้ และ สภาพในช่องคอได้ดีเท่ากับการรักษาด้วยเพนนิซิลิน

นอกจากนี้ฟ้าทะลายโจรยังมีฤทธิ์ต่างๆ ทั้งทางคลินิกและทางเภสัชวิทยาอีกมากมาย เช่น ลดความดันเลือด (กมล และคณะ, 2534) แก้โรคติดเชื้อในระบบทางเดินปัสสาวะ แก้ตับอักเสบเป็นดีซ่านเฉียบพลัน ตลอดจนฝีและแผลมีหนอง เป็นต้น ซึ่งวิธีการและผลการรักษาได้ถูกรวบรวมอยู่ในสมุนไพรเล่มที่ 1 (ชัยโย และคณะ, 2522; นันทวัน, 2529)

1.4 การควบคุมคุณภาพของยาสมุนไพร

เนื่องจากประสิทธิผลของยามีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณภาพของยา ดังนั้นการควบคุมคุณภาพยาจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ โดยเฉพาะยาจากสมุนไพรซึ่งมักมีปัญหาเรื่องความไม่สม่ำเสมอของตัวยาสำคัญในวัตถุดิบที่นำมาเตรียมยา การจะได้ยาที่มีคุณภาพดีนั้นต้องอาศัยความรู้ประสบการณ์จากผู้เกี่ยวข้องหลายด้าน นับตั้งแต่เกษตรกรผู้เพาะปลูก ต้องทราบชนิดและพันธุ์ที่ถูกต้อง มีการดูแลเอาใจใส่ที่ดี ทราบอายุที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยว กรรมวิธีการเก็บเกี่ยว ตลอดจนต้องทราบวิธีการที่เหมาะสมในการเก็บรักษาสมุนไพร ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อปริมาณแลคโตน และสารเคมีต่างๆในสมุนไพรฟ้าทะลายโจร เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ยา จากการศึกษาพบว่า

ปริมาณของสารออกฤทธิ์ที่พบในส่วนต่างๆ ของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรมีจำนวนไม่เท่ากันคือ พบสารออกฤทธิ์ปริมาณมากในใบ รองลงมาคือ ส่วนของลำต้นและกิ่งซึ่งจะพบใน

ปริมาณน้อย แต่จะไม่พบสารออกฤทธิ์ในรากและเมล็ด (วันดี, 2534) สำหรับสารเคมีที่พบในสมุนไพรฟ้าทะลายโจรสามารถดูได้จาก ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สารเคมีที่พบในสมุนไพรฟ้าทะลายโจร

ประเภท	ชื่อส่วนประกอบ	สูตรโมเลกุล	จุดหลอมเหลว	ส่วนของยา
LACTONE	Andrographolide	$C_{20}H_{30}O_5$	228~30	ใบ
	Neo- Andrographolide	$C_{26}H_{40}O_8$	167~8	ใบ
	Deoxyandrographolide	$C_{20}H_{30}O_4$	175~6.5	ใบ
	Homoandrographolide	$C_{22}H_{32}O_4$	115	ใบ
	Panicolide	$C_{10}H_{28}O_4$	175~5.5	ใบ
	14-Deoxy-11-Oxyandrogra-pholide	$C_{20}H_{28}O_5$	98~100	ทั้งต้น
	14-Deoxy-11,12-didehydrogra-pholide	$C_{20}H_{30}O_4$	260~2	ใบ
	สารรูปร่างไม่แน่นอน สีเหลือง ผลึกรูปเข็มสีขาว	-	201~3	ใบ
	Paniculide A	$C_{15}H_{20}O_4$	120~1	tissue culture
	Paniculide B	$C_{15}H_{20}O_4$	145~6	tissue culture
	Paniculide C	$C_{15}H_{18}O_5$	น้ำมัน	tissue culture
FLAVONE	Andrographin	$C_{18}H_{16}O_6$	190~1	ราก
	Pannicolin	$C_{17}H_{14}O_6$	263~4	ราก
	Mono-o-methylwightin	$C_{19}H_{18}O_7$	150	ราก
	Apigenin-7,4-dimethyl ether		-	ราก
	Flavone	$C_{16}H_{14}O_5$	166	ใบ
อื่นๆ	Andrographan	$C_{40}H_{82}$	67~8	ใบ
	Andrographon	$C_{32}H_{40}$	85	ใบ
	Panicula-wachs	-	30	ใบ
	Andrographosterin	$C_{23}H_{38}O$	135	ใบ
	Glycoside	$C_{35}H_{60}O_6$	298~300	ใบ

ประเภท	ชื่อส่วนประกอบ	สูตรโมเลกุล	จุดหลอมเหลว	ส่วนของยา
	KCl	-	-	ทั้งต้น
	NaCl	-	-	ทั้งต้น

ที่มา: วันดี (2534)

จาการทดลองของอาจารย์ ชัยโย ชัยชาญทิพยุทธ อาจารย์คณะเภสัช จุฬา (2522) พบว่า ขณะที่ต้นเริ่มออกดอกจะได้ใบที่มีเนื้อยามากที่สุด มีฤทธิ์ดีที่สุด การศึกษาปริมาณแลคโตนรวมของส่วนต่างๆที่เก็บเกี่ยวในระยะเวลาการเจริญเติบโตของพืชที่ต่างกัน ดังแสดงในตาราง 2

ตารางที่ 2 แสดงผลของระยะเก็บเกี่ยวต่อปริมาณแลคโตนของส่วนต่างๆของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร

ตัวอย่าง	ระยะเก็บเกี่ยว	ปริมาณแลคโตนรวม(%)		
		ส่วนเหนือดิน	ใบ	ลำต้น
1	ก่อนออกดอก	6.09	6.80	2.28
	ออกดอก	7.31	9.81	2.06
	ติดผลอ่อน	5.29	6.79	3.93
	ติดผลแก่	4.80	4.64	4.67
2	ก่อนออกดอก	7.05	9.54	3.02
	ออกดอก	9.79	12.52	5.81
	ติดผลอ่อน	6.72	7.25	6.25
	ติดผลแก่	5.54	6.63	6.89

ที่มา: ชัยโย (2522)

แม้ว่าผลการวิเคราะห์จะแสดงให้เห็นว่า ส่วนใบมีปริมาณแลคโตนรวมสูงกว่าส่วนเหนือดินก็ตาม แต่ในการผลิตวัตถุดิบในขั้นอุตสาหกรรมหากใช้แต่เฉพาะส่วนของใบ จะได้ปริมาณวัตถุดิบน้อยกว่าใช้ส่วนของลำต้นด้วย ประกอบกับ ส่วนของลำต้นก็พบว่ามีสารสำคัญเช่น

เดียวกัน ดังนั้นเพื่อให้สามารถใช้สมุนไพรได้อย่างคุ้มค่า ไม่สูญเสียทรัพยากรธรรมชาติตำรามาตรฐานยาสมุนไพร จึงได้แนะนำให้ใช้ส่วนเหนือดินเป็นยา

การศึกษาปริมาณสารแลคโตนแต่ละชนิดที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล (คณิตและชัยโย, 2534) พบว่า สาร Andrographolide มีปริมาณสูงสุด (5-6%) ในช่วงเดือนตุลาคม-พฤศจิกายน และลดต่ำลง (0.5%) ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ – มีนาคม สาร 14-Deoxy-11,12-didehydrogra-pholide มีปริมาณสูงสุด (7%) ในช่วงเดือน มีนาคม – เมษายน และลดต่ำลง (0.5%) ในเดือนตุลาคม – ธันวาคม สาร Neo- Andrographolide มีปริมาณสูงสุด (2%) ในช่วงเดือนธันวาคม – มกราคม และลดต่ำลงสุด (0.5%) ในเดือนเมษายน – พฤษภาคม

การศึกษาอิทธิพลของวันปลูกต่อปริมาณสารสำคัญของ หัทยา (2539) พบว่า วันปลูกมีผลต่อปริมาณสารสำคัญในฟ้าทะลายโจร โดยฟ้าทะลายโจรที่ปลูกในเดือน กันยายนและธันวาคม ใบมีแอนโดรกราโฟไลด์สูงถึง 1.24% และลดลงเมื่อปลูกในเดือนมิถุนายน-มีนาคม ต้นและกิ่งก้านมีสารแอนโดรกราโฟไลด์สูงสุดในเดือนกันยายน คือ 1.57% และลดลงเมื่อปลูกในเดือนมีนาคม ธันวาคม และ มิถุนายน

การกำหนดปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์ในสารสกัดฟ้าทะลายโจรที่มีฤทธิ์ในการรักษาโรค ในจีนกำหนดว่าถ้ามี 1.5% ก็สามารถใช้เป็นยาได้แล้ว ซึ่งในไทยมีสารนี้มากถึง 1.7%

นอกจากการควบคุมคุณภาพยาจากปริมาณสาระสำคัญ (แอนโดรกราโฟไลด์) ในวัตถุดิบแล้ว การตรวจสอบการปนเปื้อนของจุลินทรีย์และทดสอบความบริสุทธิ์ของสารก็เป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างยิ่ง จากเกณฑ์การควบคุมคุณภาพยาของ WHO ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดมาตรฐานของส่วนเหนือดินฟ้าทะลายโจร

รายการ	ไม่เกินร้อยละ	ไม่น้อยกว่าร้อยละ
ปริมาณสิ่งแปลกปลอม	2.0	
ปริมาณความชื้น	11.0	
ปริมาณเถ้าที่ไม่ละลายในกรด	2.0	
ปริมาณสารสกัดด้วยน้ำ		18.0
ปริมาณสารสกัดด้วย 85% เอทานอล		13.0
ปริมาณแลคโตสรวมคำนวณเป็นแอนโดรกราโฟไลด์		6.0

ที่มา: อรพรรณ (2546)

2. กระบวนการผลิตสารสกัดสมุนไพรฟ้าทะลายโจร

จากการตรวจเอกสารงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้เล็งเห็นถึงสรรพคุณของสารสำคัญในสมุนไพรฟ้าทะลายโจร ซึ่งมีอยู่รอบด้าน แต่เดิมผลิตภัณฑ์ฟ้าทะลายโจรจะได้จากการนำใบและลำต้นแห้งมาบดเป็นผงบรรจุแคปซูล หรืออัดเม็ด โดยปริมาณในการรับประทานในแต่ละวันจะอยู่ที่ 12-16 แคปซูล รับประทานวันละ 3-4 มื้อ มื้อละ 4 แคปซูล การรับประทานในจำนวนมากในแต่ละมื้อเป็นข้อด้อยทางด้านการตลาด นอกจากนี้ฟ้าทะลายโจรที่ได้จากแหล่งปลูกต่างที่กันจะให้ความเข้มข้นของตัวยาไม่เท่ากัน (Jain et al., 2000) จึงทำให้ยากในการกำหนดปริมาณยาในการรับประทานในแต่ละมื้อ ข้อด้อยอีกประการหนึ่ง คือ การควบคุมด้านสุขอนามัยของผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก การสกัดตัวยาจากฟ้าทะลายโจรจึงเป็นทางออกที่ดีสำหรับปัญหาเหล่านี้

2.1 การสกัด

การสกัดสารสำคัญจากพืชสมุนไพรไม่ว่าจะสกัดด้วยวิธีการใดหรือใช้ตัวทำละลายใดก็จะได้องค์ประกอบเป็นของผสมหรือสารสกัดดิบ (crude extract) ซึ่งเป็นสิ่งที่สกัดออกมาจากสมุนไพรโดยใช้ตัวทำละลาย (solvent) สารสกัดดิบนี้เป็นของผสมขององค์ประกอบทางเคมีของสมุนไพรซึ่งจะมีทั้งองค์ประกอบที่มีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา (pharmacologically active constituents) ซึ่งมักเรียกว่า สารสำคัญ (active constituents) และองค์ประกอบที่ไม่มีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา (pharmacologically inactive constituents) ซึ่งเรียกว่า สารเฉื่อย (inert

substances) ชนิดและสัดส่วนขององค์ประกอบในสารสกัดจะแปรเปลี่ยนไปตามสภาพของสมุนไพรที่ใช้และสภาวะที่ใช้ในการสกัด (รัตนา, 2547) วัตถุประสงค์ของการสกัดพืชสมุนไพร คือ

(1) เพื่อสกัดแยกเอาสารสำคัญออกจากสมุนไพร

(2) เพื่อให้ได้สารสกัดที่มีความเข้มข้นของสารสำคัญสูง

(3) เพื่อลดขนาดของการใช้สมุนไพรลงให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้สะดวกในการใช้

(4) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี

จากการศึกษาการสกัดสารสำคัญในสมุนไพรฟ้าทะลายโจรในระดับห้องปฏิบัติการพบว่า สารสำคัญสามารถสกัดได้โดยใช้ฟ้าทะลายโจรบดแห้ง และใช้ตัวทำละลายเอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์ (พรพินธุ์ และคณะ, 2540; วันวิสาข์ และศิริรัตน์, 2543) สารละลายสกัดที่ได้สามารถทำให้เข้มข้นขึ้นโดยการระเหยตัวทำละลายแล้วจึงอบแห้ง การศึกษาของกิตติศักดิ์และคณะ (2548) แสดงว่า เอทิลแอลกอฮอล์ 85% ละลายสารสกัดจากวัตถุดิบฟ้าทะลายโจรแห้งได้มากกว่า 95% แอลกอฮอล์ และเมื่อทดลองสกัดโดยใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อเอทิลแอลกอฮอล์ 85 % เป็น 1:5 และ 1:10 พบว่าร้อยละของแอนโดรกราโฟไลด์ สามารถถูกสกัดได้เท่ากับ 77 % และ 95 % ตามลำดับ การทดลองในถังกวนขนาด 50 ลิตร ซึ่งมีใบกวนแบบพิชด์เบลดเทอร์ไบน์เข้าด้านข้างถัง(รายละเอียดของถังกวนรายงานโดย ยรรยงและคณะ 2547), ที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อเอทิล แอลกอฮอล์ 85% เป็น 1:5 และ 1:10 และความเร็วของใบกวนเท่ากับ 560 และ 1,120 รอบต่อนาที ผลการทดลองแสดงว่า อัตราเร็วของการสกัดไม่ขึ้นกับความเร็วรอบของการกวน และการสกัดถือได้ว่าสมดุลเมื่อใช้เวลาปฏิบัติการไม่เกิน 6 ชั่วโมง

ในงานวิจัยนี้ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดสมุนไพรฟ้าทะลายโจรผง คือ เอทิล แอลกอฮอล์ เนื่องจากเอทิลแอลกอฮอล์สามารถสกัดสารแอนโดรกราโฟไลด์ในฟ้าทะลายโจรได้ดี ระเหยได้ง่ายกว่าน้ำและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงทำให้สะดวกในการทำให้สารสกัดเข้มข้น และยังสามารถอบแห้งในอุณหภูมิที่ต่ำ ซึ่งจะทำให้ไม่สูญเสียสารสำคัญเนื่องจากความร้อน

2.2 กระบวนการระเหยและการอบแห้ง

สารสกัดที่ได้จากกระบวนการสกัดจะอยู่ในรูปสารละลายซึ่งมีปริมาณตัวทำละลายมาก ทำให้ต้องระเหยตัวทำละลายออกก่อนนำไปอบแห้ง เพื่อลดระยะเวลาในการอบแห้ง

ก. การระเหย (evaporation)

การระเหย เป็นวิธีการไล่ตัวทำละลายออกจากสารละลายโดยวิธีการต้ม วัตถุประสงค์ของการระเหยตัวทำละลายออกเพื่อทำให้สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น ก่อนที่จะนำไปแปรรูปด้วยกระบวนการอื่นๆต่อไป เช่น อบแห้ง และการแช่เยือกแข็ง เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน นอกจากนี้ยังช่วยกำจัดตัวทำละลายที่ไม่ต้องการอีกด้วย

เนื่องจากกระบวนการระเหยมีการใช้ความร้อน จึงทำให้สูญเสียสารให้กลิ่นบางชนิดที่ระเหยได้ง่ายออกไป และการระเหยยังทำให้สีของสารละลายเข้มขึ้น เพราะความเข้มข้นของปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น การลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหย

ข. การอบแห้ง (drying)

การอบแห้ง หมายถึง การกำจัดตัวทำละลายในสารสกัดเข้มข้นจนทำให้สารสกัดเข้มข้นแห้ง ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังผิวชั้นด้านนอกของสารสกัด เพื่อกำจัดตัวทำละลายออกโดยการระเหย หรือระเหิดน้ำแข็ง โดยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย (latent heat of vaporization) วัตถุประสงค์ของการอบแห้งคือ การยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์โดยลดปริมาณตัวทำละลาย ความชื้นหรือวอเตอร์แอคทิวิตี้ลง ถึงระดับที่สามารถป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การทำงานของเอนไซม์ หรือปฏิกิริยาอื่นๆได้ นอกจากนี้การอบแห้งจะช่วยในการกำจัดตัวทำละลายที่ไม่ต้องการออกได้อีกด้วย

สิ่งที่มีบทบาทต่อการอบแห้งสารสกัด คือ ตัวทำละลายที่อยู่ในสารสกัด ซึ่งถ้าวัสดุที่มีความชื้นมากจะเสื่อมเสียได้เร็ว โดยการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ และ เคมี ประเภทของน้ำในวัสดุ (ความชื้น) แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

(1) น้ำอิสระ (free water) น้ำที่แทรกอยู่ระหว่างวัสดุ อาจมีการเกาะตัวอยู่ระหว่างองค์ประกอบของวัสดุบ้าง ด้วยแรงที่ไม่แข็งแรงมากนัก มีคุณสมบัติเหมือนน้ำปกติ สามารถเป็นตัวทำละลายได้ มีส่วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีและจุลินทรีย์ สามารถนำไปใช้ในการดำรงชีวิตได้ แต่น้ำส่วนนี้ก็มีคุณสมบัติไม่เหมือนกับน้ำอิสระที่มีอยู่ในธรรมชาติอย่างแท้จริง จึงมักเรียกน้ำอิสระนี้ว่า แอกทีฟวอเตอร์ (active water) สามารถแยกจากองค์ประกอบอื่นได้ง่าย

ในสารชนิดหนึ่งมีองค์ประกอบที่ละลายน้ำหรือเกิดคอลลอยด์กับน้ำได้มากมายหลายชนิด องค์ประกอบเหล่านี้สร้างพันธะกับน้ำ น้ำจึงอยู่ในสถานะเกาะเกี่ยวกับพันธะอื่นส่วนที่เหลือเป็นน้ำอิสระ ถ้าองค์ประกอบของสารหรืออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อน้ำอิสระโดยทางอ้อม จึงทำให้ปริมาณน้ำอิสระไม่คงที่ ดังนั้น วัสดุต่างชนิดกันมีความชื้นเท่ากันไม่จำเป็นต้องมีน้ำอิสระเท่ากัน ถ้าวัสดุนั้นมีน้ำอิสระมาก (วอเตอร์แอคทิวิตี้สูง) จะเน่าเสียง่ายเนื่องจากจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดี การทราบปริมาณน้ำอิสระในวัสดุแต่ละชนิดจึงมีความจำเป็นมากในการคาดเดาว่าวัสดุนั้นจะเสียด้วยจุลินทรีย์หรือไม่

(2) น้ำผูกพัน (bound water) เป็นน้ำที่มีโมเลกุลของน้ำเกาะติดกับวัสดุด้วยพันธะที่แข็งแรงมาก อาจเป็นพันธะโควาเลนต์ ไฮโดรเจนต์ อิออนิก และ พันธะอื่นๆ ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายไม่มีส่วนในปฏิกิริยาเคมี และจุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (โชคชัย, 2539; ประเสริฐ และชลลดา, 2539; วิไล, 2545)

ค. วอเตอร์แอคทิวิตี้ (water activity)

การเสื่อมของผลิตภัณฑ์เนื่องจากจุลินทรีย์จะเกิดขึ้นเร็วกว่าปฏิกิริยาจากเอนไซม์หรือปฏิกิริยาเคมีซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้าๆในระหว่างการเก็บรักษา แต่ในทุกกรณีน้ำจะเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่ควบคุมอัตราการเสื่อม การแสดงปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์สามารถอธิบายในรูปของร้อยละได้ดังนี้

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบแห้ง- น้ำหนักหลังอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักก่อนอบแห้ง}} \qquad (1)$$

การแสดงปริมาณความชื้นแบบฐานเปียก (wet weight basis)

$$M = \frac{\text{มวลของน้ำ x 100}}{\text{มวลของตัวอย่าง}} \qquad (2)$$

$$M = \frac{\text{มวลของน้ำ x 100}}{\text{มวลของน้ำ + ของแข็ง}} \qquad (3)$$

การแสดงปริมาณความชื้น แบบฐานแห้ง (dry weight basis)

$$M = \frac{\text{มวลของน้ำ x 100}}{\text{มวลของของแข็ง}} \quad (4)$$

นิยมใช้ความชื้นแบบฐานแห้งในการคำนวณเกี่ยวกับกระบวนการในขณะที่ปริมาณความชื้นเปียกใช้บอกองค์ประกอบของน้ำในวัสดุ ในการแสดงค่าความชื้นจึงควรระบุด้วยว่าใช้ระบบใด

ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ (a_w) คือ อัตราส่วนระหว่างความดันไอของน้ำในวัสดุต่อความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยน้ำในวัสดุจะทำให้เกิดความดันไอ ขนาดของความดันไอขึ้นกับ ปริมาณของน้ำที่มีอยู่ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย โครงสร้างของวัสดุ (รุ่งนภา, 2535) โดยเฉพาะเกลือและน้ำตาลในน้ำ และความชื้นสัมพัทธ์รอบๆวัสดุ

การวัดค่า a_w ของวัสดุทำได้หลายวิธี คือ

(1) การหาจุดเยือกแข็งของวัสดุ วิธีการนี้หาได้เฉพาะในวัสดุเหลวที่มีค่า a_w สูง

(2) การใช้นาโนเมตริกเทคนิค วิธีนี้เป็นวิธีการวัดความดันไอบริเวณรอบๆวัสดุโดยตรง ค่าที่ได้จะถูกต้องมากที่สุด โดยน้ำอิสระมีความสัมพันธ์กับความดันไอ ตามกฎของเราท์ (Raoult,s law) กล่าวคือความดันไอเป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณน้ำอิสระของน้ำ ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้ค่าความดันไอเป็นตัววัดความเป็นอิสระของน้ำ (นิธิยา, 2544)

$$a_w = \frac{P_0}{P} \quad (5)$$

a_w คือ ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ หรือปริมาณน้ำอิสระในวัสดุ

P_0 คือ ความดันย่อยไอของไอน้ำในอากาศ

P คือ ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง

ในการทดลองเพื่อหา a_w จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำในภาชนะที่ปิดสนิทและจะต้องหารความชื้นสัมพัทธ์เหนือวัสดุด้วย100 ก็จะเป็นค่าของวอเตอร์แอคทิวิตี้ ค่าวอเตอร์ แอคทิวิตี้ ของน้ำบริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 1.00 ความชื้นสัมพัทธ์รอบๆวัสดุมีผลต่อค่า a_w ที่ผิวหน้าของวัสดุ เช่น

ถ้าความชื้นสัมพัทธ์รอบๆวัสดุต่ำกว่าในวัสดุจะทำให้ a_w ที่ผิวหน้าของวัสดุลดลง และในทางกลับกัน a_w ที่ผิวหน้าของวัสดุจะเพิ่มขึ้นถ้าความชื้นสัมพัทธ์รอบๆวัสดุสูงกว่าในวัสดุ

(3) การใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า วิธีนี้มีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิดในการวัดหาค่า a_w โดยทางอ้อม แต่ที่นิยมใช้แพร่หลาย คือ การใช้เซ็นเซอร์ในการวัดความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศรอบๆวัสดุ (นิธิยา, 2544)

$$a_w = \frac{\text{ความชื้นสัมพัทธ์}}{100} \qquad (6)$$

ผลของแอคทิวิตี้ต่อวัสดุ

วอเตอร์แอคทิวิตี้ (a_w) ของวัสดุเป็นปริมาณน้ำที่จุลินทรีย์ เอนไซม์ หรือปฏิกิริยาเคมีนำไปใช้ได้ ปัจจุบันเป็นที่ทราบแน่ชัดแล้วว่าจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในวัสดุที่ปราศจากน้ำหรือวัสดุแห้ง เมื่อวัสดุนั้นมี a_w อยู่ในช่วง 0.6-0.7 หรือต่ำกว่า แต่ก็ยังมีปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นได้ทั้งที่มีเอนไซม์และ ไม่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวหากเกิดขึ้นจะทำให้สี กลิ่น รสชาติ และความคงตัวเปลี่ยนไปด้วยระหว่างการแปรรูปและเก็บรักษา (นิธิยา, 2544) ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความสำคัญของวอเตอร์แอคติวิตี้ต่อวัสดุ

a_w	ปรากฏการณ์	ตัวอย่างวัสดุ
1.00		วัสดุสดและมีความชื้นสูง
0.95	ยับยั้งการเจริญของ Pseudomonas, Bacillus, Clostridium perfringens และยีสต์บางชนิด	วัสดุที่มีน้ำตาล 40%หรือเกลือ 7%ไส้กรอก สุก ขนมปัง
0.90	ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับการเจริญของแบคทีเรียทั่วไป เช่น Salmonella, Lactobacillus, Vinrio paraheamolyticus, Clostridium botulinum, รวมทั้งยีสต์และราบางชนิด	วัสดุที่มีน้ำตาล 50% หรือเกลือ 12% แฮมเนยแข็งบ่มระยะกลาง วัสดุที่มีความชื้นปานกลาง (intermediate-moisture foods คือมี a_w = 0.90-0.55)

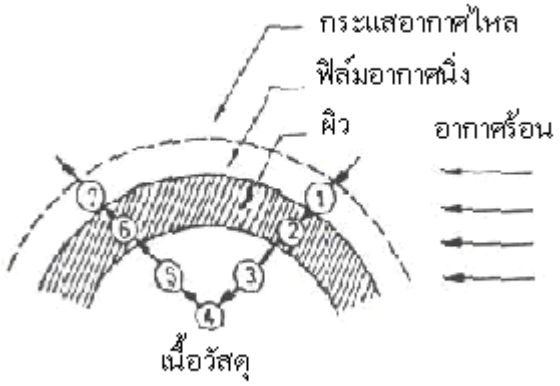
ตารางที่ 4 (ต่อ)

a_w	ปรากฏการณ์	ตัวอย่างวัสดุ
0.85	ยีสต์ส่วนใหญ่ถูกยับยั้งการเจริญเติบโต	วัสดุที่มีน้ำตาล 65% หรือ เกลือ 15% ซาลามิ เนยแข็งบ่มสุกเต็มที่ มาการีน
0.80	ขีดจำกัดต่ำสุดของการเจริญเติบโตของเอนไซม์ส่วนใหญ่และการเจริญเติบโตของเชื้อราส่วนใหญ่ Staophylococcus aureus ถูกยับยั้งการเจริญเติบโต	แป้ง ข้าว (ความชื้น 15-17%) เค้กผลไม้ นมข้น น้ำเชื่อมผลไม้ ฟองดองท์
0.75	ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับแบคทีเรียฮาโลไฟล์	Marzipan (ความชื้น 15-17%) แยม
0.70	ขีดจำกัดต่ำสุดของเชื้อรา Xerophile ส่วนใหญ่	
0.65	อัตราเร็วสูงสุดในการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับการเจริญของยีสต์และ	ฟัดจ์ (fudge) กากน้ำตาล ถั่วเมล็ดมัน
0.60	ราประเภท osmophile หรือ xerophile	ผลไม้แห้งความชื้น (5-20%) ทอฟฟี่ คาราเมล(ความชื้น 8%) น้ำผึ้ง
0.55	เกิดความผิดปกติกับกรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับสิ่งมีชีวิต)	
0.50		วัสดุแห้ง (a_w = 0-0.55)
0.40	อัตราเร็วต่ำสุดในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น	เครื่องเทศ เส้นก๋วยเตี๋ยว ไข่ผง(ความชื้น 5%) แครกเกอร์ เปลือกขนมปัง (ความชื้น 3-5%)
0.30		
0.25	ความต้านทานสูงสุดของสปอร์แบคทีเรีย	
0.20		นมผง (ความชื้น 2-3%) ผักแห้ง (ความชื้น 5%) คอร์นเฟลค (ความชื้น 5%)

ที่มา: นันทนา (2534)

ง. ทฤษฎีการอบแห้ง

ในการอบแห้งวัสดุด้วยลมร้อน ปรากฏการณ์เกิดขึ้นจะเป็นทั้งการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลพร้อมๆกัน ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทเข้าไปภายในวัสดุโดยผ่านความต้านทานของฟิล์มอากาศนิ่ง และความต้านทานภายในของวัสดุตามลำดับ เมื่อความร้อนถ่ายเทเข้าภายในวัสดุ น้ำภายในวัสดุจะรับความร้อนและเกิดการระเหยจะถ่ายเทมวลออกสู่ภายนอกวัสดุโดยผ่านความต้านทานภายในวัสดุ และความต้านทานของฟิล์มตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดง การถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุ

(1) ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่ฟิล์มอากาศนิ่ง
(2) ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่ผิววัสดุ
(3) ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนในเนื้อวัสดุ
(4) น้ำที่จะระเหย
(5) ความต้านทานการถ่ายเทความมวลในเนื้อวัสดุ
(6) ความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุ
(7) ความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ฟิล์มอากาศนิ่ง

1) การถ่ายเทความร้อน

กระบวนการอบแห้งความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวนอกของวัสดุที่ชื้นเพื่อกำจัดความร้อนออกโดยการระเหย หรือระเหิดน้ำแข็งโดยความร้อนที่ได้รับจะเป็นความร้อนแฝงของการระเหย การถ่ายเทความร้อน ความร้อนจะเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ 3 วิธี คือ

การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี ซึ่งการเคลื่อนที่ของความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้น แต่กลไกในการที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนแต่ละวิธีต่างกัน

1.1) การนำความร้อน

การนำความร้อน คือ การนำความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ภายในตัวกลางเดียวกัน หรือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกัน แต่มีอุณหภูมิที่ต่างกัน ในการนำความร้อน ความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลสาร โดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่

ค่าการนำความร้อนเป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิด ขึ้นกับอุณหภูมิและความร้อน (Goring, 1985) ค่าสภาพนำความร้อนของน้ำจะมีค่ามากกว่าค่าของวัตถุแห้งที่เป็นวัสดุ เช่น ในผักและผลไม้สด ซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก ค่าสภาพนำความร้อนของผัก และผลไม้สดดังกล่าวจะไม่ต่างจากค่าของน้ำบริสุทธิ์มาก อย่างไรก็ตาม ขณะที่การอบแห้งเกิดขึ้นกับวัตถุ ค่าสภาพนำความร้อนจะลดลง (Van Arsdel, 1963) จากการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ผิวหนังของวัตถุที่ชื้นจะแตกต่างเพียงเล็กน้อยจากอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet-bulb temperature) ลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อการระเหยเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของวัตถุที่ชื้นจริงๆ อย่างมีประสิทธิภาพเท่านั้น (Goring, 1985)

1.2) การพาความร้อน

การพาความร้อน คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของแข็งและของไหล ของไหลเป็นตัวพาความร้อนมาให้หรือพาความร้อนจากผิวของแข็งออก การพาความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การพาโดยบังคับ เช่น ของไหลเคลื่อนที่ด้วยแรงจากพัดลม เครื่องดูดอากาศ หรือปั๊มสุญญากาศ และการพาตามธรรมชาติของไหลจะเคลื่อนที่เองตามธรรมชาติ

1.3) การแผ่รังสี

การแผ่รังสี คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในสุญญากาศ การถ่ายเทพลังงานโดยการแผ่รังสีนั้นเกิดเพียงส่วนน้อยในกระบวนการอบแห้งวัสดุ แต่ในกรณีของการอบแห้งวัสดุแบบสุญญากาศ และการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีเป็นหลัก นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนแบบ

แผ่รังสียังใช้กระบวนการอบแห้งวัสดุอื่นๆ เช่น การอบแห้งแบบพ่นฝอย การอบแห้งแบบถาด การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่รังสีจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Van Arsdel, 1963)

ในทางปฏิบัติการถ่ายเทความร้อนทั้งสามวิธีจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่ามีลักษณะอย่างใด เช่น วัตถุที่มีลักษณะเป็นรูพรุนเล็กๆ ซึ่งภายในช่องว่างเต็มไปด้วยของเหลวหรือไอ การถ่ายเทความร้อนภายในที่เกิดขึ้นจะเป็นการนำความร้อน แต่ถ้าช่องว่างภายในมีขนาดใหญ่ และมีของเหลวอยู่ด้วยการถ่ายเทความร้อนภายในของเหลวจะเป็นการพาความร้อน ซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ถ้าความดันอากาศรอบๆ วัตถุนั้นลดลง ซึ่งเกิดขึ้นกับการอบแห้งแบบสุญญากาศ การถ่ายเทความร้อน จะพบว่าเป็นการแผ่รังสี (Van Arsdel, 1963)

2) การถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) คือลำดับขั้นดังต่อไปนี้

(1) การแพร่ของน้ำจากภายในสารมายังผิวรอบนอกของสาร

(2) การระเหยของน้ำจากผิวรอบนอกของสาร

(3) การแพร่ของไอน้ำจากผิวรอบนอกของสารไปยังอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านสาร

เมื่อพิจารณาตรงผิวรอบนอกของสารที่จะทำให้แห้ง ถ้าผิวรอบนอกของสารมีฟิล์มของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่องและไม่มีจุดหรือบริเวณที่แห้ง หรือช่วงการอบแห้งด้วยอัตราเร็วคงที่ อัตราการระเหยของน้ำที่ผิวรอบนอกของสารจะขึ้นกับอัตราการถ่ายเทความร้อน (rate of heat transfer) และหลังจากนั้น เมื่ออยู่ในช่วงการอบแห้งที่อัตราเร็วลดลง อัตราการระเหยจะเท่ากับอัตราการแพร่ของไอน้ำ

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

(1) ความเร็วของความร้อน การอบแห้งที่ต้องการความรวดเร็ว เราจะต้องผ่านอากาศที่มีอุณหภูมิสูงพอสมควรเข้าไปในชั้นของวัสดุ อากาศร้อนจำนวนนี้จะเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารโดยทำหน้าที่ 2 อย่างในเวลาเดียวกัน คือ ประการแรก ความร้อนที่มีอยู่ในอากาศจะถูกถ่ายเทให้กับวัสดุเพื่อทำให้วัสดุคายความชื้นแล้วในวัสดุที่มีความชื้นสูงขึ้น หรือไปเพิ่มพลังงานให้กับน้ำที่อยู่ภายในวัสดุ ประการที่สอง อากาศร้อนจะช่วยพาเอาความชื้นหรือไอที่ซึมผ่านมาที่ผิวของวัสดุหลุดไปพร้อมๆกับอากาศ (กมลรัตน์, 2528)

(2) เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง การใช้เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชนั้น ระยะเวลาในการอบมีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา ความแข็งแรงของเมล็ด และความสามารถในการงอกของเมล็ด ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ถ้าไม่เหมาะสมจะทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำในเมล็ดมายังผิวไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการแตกหักของเมล็ดอันเนื่องจากการหดตัวไม่เท่ากันระหว่างเนื้อเยื่อในเมล็ดและเปลือกหุ้ม

(3) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (relative humidity) คือ ถ้าค่าความแตกต่างระหว่างความชื้นสัมบูรณ์ที่ผิวหน้าสารที่ไอน้ำระเหยออกมาและความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศมาก อัตราการอบแห้งจะเร็ว ซึ่งการเพิ่มค่าความแตกต่างความชื้นสัมพัทธ์นี้ ในทางทฤษฎีทำได้โดยลดความชื้นของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านผิวหน้าสาร แต่ในทางปฏิบัติทำได้โดยเพิ่มอุณหภูมิของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านผิวหน้าสาร

(4) อุณหภูมิของแหล่งกำเนิดความร้อน ซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

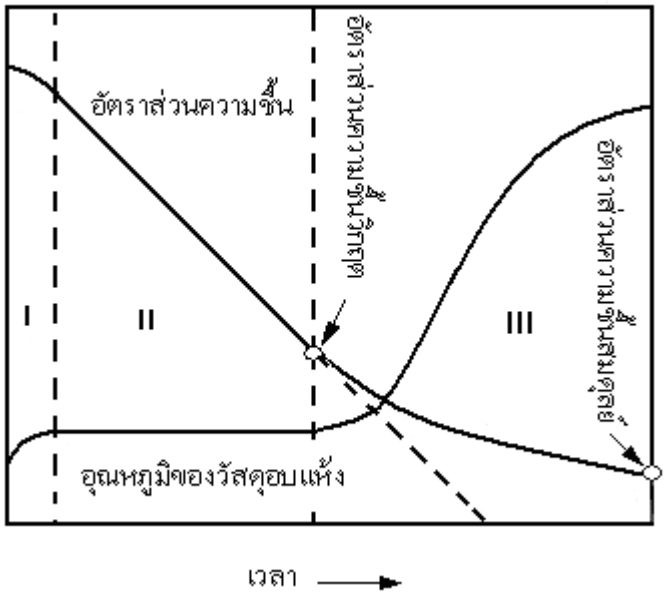
(5) ความหนา เมื่อความหนาของสารน้อย ความสามารถในการสัมผัสกับความร้อนจะดีที่สุด ซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนเพิ่มขึ้น

เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง (Drying Characteristic Curve)

ในกรณีที่วางวัสดุเปียกใดๆ ภายใต้สภาวะคงที่ เช่น ในกรณีที่วางวัสดุเปียกชื้นภายในกระแสลมที่อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมคงที่ ถ้าเราลองวัดการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุนี้กับเวลา จะได้เส้นกราฟ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนใหญ่ๆได้ดังภาพที่ 5

ที่ผิวของวัสดุเปียกชื้น ความชื้นที่ผิวจะอยู่ในรูปของน้ำ ดังนั้น ถ้าเอาวัสดุนี้มาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขคงที่ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก(wet bulk temperature) ของกระแสลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่านี้ คือ ช่วงที่ I (ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ) ในช่วงเวลาที่ II (ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่) อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ประมาณอุณหภูมิกระเปาะเปียกของกระแสลมร้อน ตราบใดที่ยังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปของน้ำที่ผิววัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับในช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลง เป็นสัดส่วนกับเวลาในช่วง II นี้ ดังนั้นความเร็วของการระเหยจะมีค่าคงที่ (constant drying rate) และในช่วง III (ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง) ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิววัสดุจะระเหยหมดไป เพราะการถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของน้ำที่ผิววัสดุ ดังนั้นผิววัสดุจะอยู่ใน

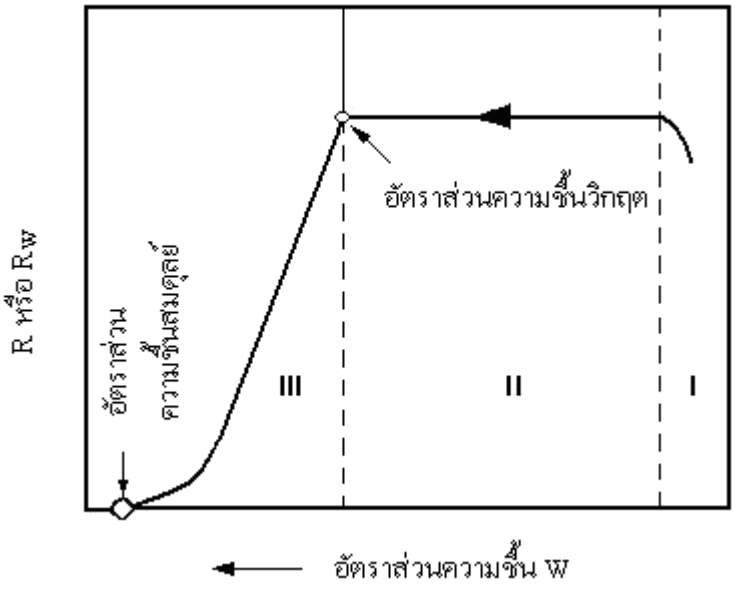
สภาพที่แห้งและอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น สรุปแล้วความเร็วของการอบแห้งจะค่อยๆลดลง เพราะปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับนอกจากจะลดแล้ว ความร้อนนี้ยังต้องใช้ในการระเหยความชื้น และ เพิ่มอุณหภูมิด้วย การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่ออัตราส่วนของความชื้นลดลงถึงค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ค่าของอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจุดต่อระหว่างช่วง II และ III มีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนความชื้นวิกฤต(Critical moisture content) ในกรณีของวัสดุที่มีช่วง II และIII ยาวนานมากก็ไม่คำนึงถึงช่วง I ก็ได้ และในกรณีของวัสดุที่ไม่เปียกชื้น อาจมีเฉพาะช่วง III ก็ได้ (วิวัฒน์, 2525)



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่ออบแห้งวัสดุภายใต้กระแสลมร้อนที่มีอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมคงที่

ที่มา: วิวัฒน์ (2525)

เส้นกราฟที่ได้จากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้ง และอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย เรียกว่า เส้นลักษณะเฉพาะการอบแห้ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยกับเวลา ในภาพที่ 5 ก็คือ อัตราการอบแห้งนั้นเอง ถ้าเขียนกราฟของอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้น จะได้กราฟดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 เส้นลักษณะเฉพาะการอบแห้ง

ที่มา: วิวัฒน์ (2525)

สำหรับการอบแห้งวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนการอบแห้งจะแบ่งได้ 2 ช่วง คือ อัตราการอบแห้งคงที่ และ ช่วงการอบแห้งลดลง

(1) อัตราการอบแห้งคงที่ ช่วงนี้ปริมาณความชื้นของวัสดุ มีค่าสูงกว่าปริมาณความชื้นวิกฤต ที่ผิวของวัสดุมีน้ำเกาะอยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อผ่านอากาศร้อนไปยังผิวของวัสดุ ความร้อนสัมผัสจากอากาศจะถ่ายเทไปยังวัสดุ เพื่อระเหยน้ำจากผิววัสดุไปยังอากาศ

(2) อัตราการอบแห้งลดลง ช่วงนี้ปริมาณความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าปริมาณความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและมวลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิวของวัสดุมายังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งจะถูกควบคุมโดยความต้านทานการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ทำให้เกิดเกรเดียนท์ความชื้นและอุณหภูมิภายในวัสดุจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ (อาภาภร, 2541)

จ. เครื่องอบแห้ง

ยาประกอบด้วยสารประกอบทั้งทางเคมีและชีวภาพหลายชนิด สารประกอบเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับการอบแห้ง เนื่องจากสารประกอบบางชนิด ยากต่อการอบแห้ง ด้วยเหตุผลนี้วิธีการอบแห้งยาที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจึงมีอยู่อย่างมากมายหลายวิธี เช่น การอบแห้งแบบถาด, Fluid bed, spray dryers, vacuum, freeze dryers

จากข้อมูลในหนังสือเกี่ยวกับการอบแห้งในเชิงอุตสาหกรรม (handbook of industrial drying) (Arun, 1995) ได้รวบรวมเครื่องมืออบแห้งในส่วนของการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางด้านเภสัชกรรม (pharmaceutical products) เป็นจำนวนมากได้แก่

(1) เครื่องอบแห้งประเภทส่งผ่านความร้อนโดยตรงแบบไม่ต่อเนื่อง เช่น เตาอบ (Ovens) และเครื่องอบแห้งชนิด fluid bed dryers เป็นต้น

(2) เครื่องอบแห้งประเภทส่งผ่านความร้อนโดยตรงแบบต่อเนื่อง เช่น เครื่องอบแห้งแบบถาดชนิดหลายถาดซ้อนกัน (turbo-tray dryers) เครื่องอบแห้งแบบไซโคลน (cyclone dryers) เป็นต้น

(3) เครื่องอบแห้งประเภทส่งผ่านความร้อนโดยอ้อม เช่น เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหมุน (drum dryers) เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ (vacuum dryers) เครื่องอบแห้งโดยการลดอุณหภูมิลงต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (freeze dryers) เป็นต้น

ในการเลือกและพิจารณาใช้เครื่องอบแห้งแต่ละแบบแต่ละประเภทดังกล่าวนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายประการ เช่น การป้องกันหรือหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (oxidation reaction) กับอากาศ การปนเปื้อนจากวัสดุภายในที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้ง และนอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติที่เนื้อวัสดุผลิตภัณฑ์ ความทนทานและความไวต่อความร้อน (thermal sensitivity) และอื่นๆ เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อต้องการที่จะรักษาคุณภาพ และคุณสมบัติของตัวยาที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ไม่ให้ได้รับความเสียหายหรือเสียสภาพไป

ผลิตภัณฑ์ทางยา สามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ประเภท

(1) วัสดุที่เป็นเม็ด: ของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ด มีขนาดประมาณ 0.05-5 mm

(2) วัสดุหนืด: ของแข็งผสมกับของเหลว สามารถไหลได้อย่าอิสระ แต่หนืดอนุภาคมีขนาดประมาณ 0.1-50 ไมโครเมตร

(3) สารละลายและสารแขวนลอย: ของแข็งที่ละลาย หรือ แขวนลอยในของเหลวในรูปแบบที่ละเอียด10-50ไมโครเมตร, ละเอียดพิเศษ 0.1-10 ไมโครเมตร, คอลลอยย์ <0.1 ไมโครเมตร แขวนลอยอยู่

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งออกตามลักษณะของสารตามรูปแบบการรวมตัวของอนุภาคได้ 2 กลุ่ม ดังนี้

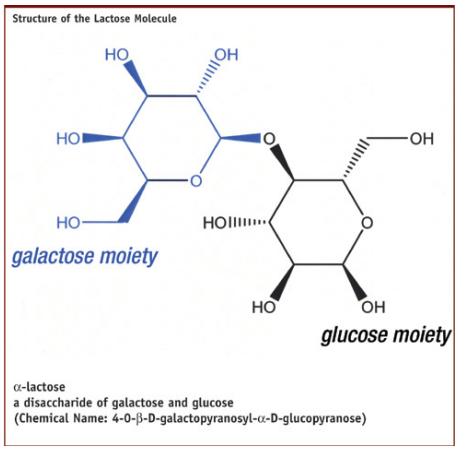
(1) รวมตัวเป็นผงผลึก (Crystalline solids) หรือ ผงอัดร่วน (granular solids) สารกลุ่มนี้จะมีน้ำในผลึกอยู่ที่ผิวตื้นๆ รวมทั้งน้ำที่อยู่ในช่องโพรงระหว่างอนุภาค แต่เคลื่อนที่ไปสู่ผิวได้ไม่ยากโดยการซึมตามแรงโน้มถ่วง หรือดันออกไปตามโพรงเมื่อผิวน้ำที่ผิวหน้าระเหยไป น้ำในโพรงจะเคลื่อนที่ออกมาแทนที่ทำให้ผิวเปียกอยู่ตลอดเวลา จึงทำให้สารกลุ่มนี้เมื่อแห้งสนิทจะมีค่าความชื้นที่ต่ำมาก คือ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ โดยที่เวลาการระเหยแห้งส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง II คือ เป็นช่วงที่ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในอัตราคงที่ และอัตราการระเหยจะลดลงอย่างช้าๆ แต่จะเกิดขึ้นในระยะเวลาสั้น ตัวยาในสารกลุ่มนี้ ได้แก่ แคลเซียมซัลเฟตซิ้งออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ส่วนใหญ่ทำให้ทนความร้อนได้ดี แต่เมื่อรับความร้อนที่สูงมากๆ จะทำให้รูปผลึกยาเปลี่ยนแปลงจนประสิทธิภาพทางยาเสื่อมไป

(2) รวมตัวเป็นผงไร้ผลึก หรือ ผงอสัญฐาน (amorphous solids) สารเยื่อ สารเจล ได้แก่ แป้ง เคซีน ยีสต์ อินซูลิน และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น สารกลุ่มนี้มีน้ำอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลและอยู่ในช่องโพรงฝอย ทำให้น้ำเคลื่อนตัวออกมายาก การระเหยแห้งจึงยากกว่าสารกลุ่มแรก โดยมีอัตราการระเหยลดลงคงที่ในระยะเวลาสั้น และอัตราการระเหยจะลดช้าลงซึ่งเกิดขึ้นเป็นระยะเวลานาน เมื่ออบเสร็จความชื้นตกค้างจะมีสูงมากและทำการเร่งกระบวนการการระเหยให้เร็วขึ้นโดยการเพิ่มความร้อนไม่ได้ เพราะ สารกลุ่มนี้ทนความร้อนสูงไม่ได้จะทำให้ประสิทธิภาพทางยาเสื่อมลง ทำให้ต้องระเหยแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ความดันบรรยากาศต่ำ และพ่นลมใส่แรงๆ เพื่อทำให้ไอน้ำที่มีอยู่รอบสารลอยออกไป ทำให้น้ำที่อยู่ในสารระเหยออกมาได้อีกการเปลี่ยนแปลงขณะระเหยแห้งของสารแต่ละชนิดมีสภาพต่างกัน โดยในช่วงที่ผิวหน้าสารบางส่วนหรือทั้งหมดแห้ง อัตราการทำให้แห้งจะถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ของความชื้นภายในสารมายังผิวหน้าสาร เมื่อสารเริ่มแห้งผิวหน้าของสารที่แห้งจะหดตัว การหดตัวจะทำให้โพรง อุดตันและบิดเบี้ยวไป ทำให้ความชื้นที่ผิวหน้าสารเคลื่อนที่ได้ลำบาก ปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกว่า “ case hardening ” หมายถึงปรากฏการณ์ที่ผิวหน้าสารแข็งมากกว่าภายในสาร และทำให้ความชื้นภายในสารซึมออกไปยังผิวหน้าสารได้น้อยลง

ในการศึกษากระบวนการสกัดฟ้าทะลายโจรในระดับห้องปฏิบัติการ (วันวิสาข์และศิริรัตน์, 2542) พบว่าหลังจากนำสารที่ได้ในการสกัด (crude extract) ของผงฟ้าทะลายโจรอบแห้งด้วยตัวทำละลายเอทิลแอลกอฮอล์ 95 % ในอัตราส่วน 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ไปเทใส่ภาชนะอบแห้งโดยให้สารละลายบางที่สุด แล้วนำอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดไม่ต่อเนื่อง (batch tray dryers) ผลปรากฏว่าอุณหภูมิเหมาะสมที่สุดที่ไม่ทำให้สารสำคัญที่มีฤทธิ์ทางยา ได้แก่ andeographolide เสียสภาพไป คืออุณหภูมิไม่สูงกว่า 55 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาการสกัดฟ้าทะลายโจร (นาฏยา และสมสมร, 2541) พบว่าสารละลายสกัดที่ได้จากเอทิลแอลกอฮอล์ การสกัดสมุนไพรฟ้าทะลายโจรสามารถทำให้แห้งได้โดยเติมแลคโตสในอัตราส่วนสารละลายเข้มข้นต่อแลคโตส คือ 1 ต่อ 0.25

แลคโตส (lactose or milk sugar) หรือน้ำตาลนม เป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ (กลูโคส +กาแลคโตส) พบในน้ำนมเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แลคโตส สังเคราะห์ขึ้นในเต้านม น้ำนมจะมีแลคโตสเฉลี่ยประมาณ 4.8 เปอร์เซ็นต์ แลคโตสมีลักษณะเป็นผงสีขาวถึงขาวขุ่น ไม่มีกลิ่น มีรสหวาน ความหวานประมาณ 15% ของซูโครส ละลายน้ำไม่ละลายในแอลกอฮอล์ ไม่ดูดความชื้น ราคาไม่แพงมาก แลคโตสที่ขายส่วนใหญ่ จะมีขนาด 60 -100 mesh ซึ่งขนาดจะมีผลต่อการละลาย โดยแลคโตสมีสูตรโครงสร้างทางเคมี ดังภาพที่7



ภาพที่ 7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของแลคโตส

ประโยชน์ของแลคโตส

(1) ช่วยในการสร้างเซลล์สมองของเด็กอ่อน

(2) เป็นตัวควบคุมการ fermentation ของผลิตภัณฑ์นม เพราะแลคโตสเป็นแหล่งวัสดุอย่างดีสำหรับจุลินทรีย์ เนื่องจากแลคโตสถูกทำให้สลายตัวได้ง่ายโดยแบคทีเรีย ทำให้เกิดกรดแลคโตส ซึ่งทำให้น้ำนม มีรสเปรี้ยว

(3) ทำให้เกิดสีและกลิ่นในผลิตภัณฑ์นมและขนมปัง เนื่องจากแลคโตส เมื่อถูกความร้อนจะให้สีน้ำตาล (caramel) หรือปฏิกิริยาที่เรียกว่า Maillard reaction

(4) ใช้เป็นส่วนประกอบของ media ในการเลี้ยงเชื้อรา penicill

(5) ช่วยให้การดูดซึมแคลเซียมจากผนังลำไส้ดีขึ้น ประมาณ 15-50% ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับเอนไซม์ ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่จะย่อยน้ำตาลแลคโตส

(6) ในอุตสาหกรรมการผลิตยา แลคโตสถูกใช้เป็นสารช่วยในการทำยาเม็ดและแคปซูล โดยมีคุณสมบัติเป็นสารเพิ่มปริมาณ (Diluents หรือ Fillers) เพื่อลดขนาดตัวยาสำคัญ ซึ่งจะทำให้ความสม่ำเสมอของตัวยาสำคัญในแต่ละเม็ดหรือแคปซูลดีขึ้น และยังช่วยป้องกันหรือทำให้มีประจุไฟฟ้าสถิตย์น้อยลงในระหว่างการย่อยขนาดตัวยาบางชนิด นอกจากนี้แลคโตสยังใช้ผสมกับตัวยาเพื่อเป็นสารยึดเกาะ สารช่วยแตกตัว สารช่วยลื่นไหล หรือสารช่วยอื่นตามต้องการในการทำแกรนูลแบบแห้ง ในบางกรณีแลคโตสถูกใช้ในการดูดซับสารสกัดที่เป็นของเหลวเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปผงแห้งได้อีกด้วย (เพียรกิจ ,2546)

หลักการทำงานและส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum Drying) (นันทนา, 2534)

เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ นี้เป็นเครื่องอบแห้งที่อาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายโอนมวลสาร โดยมีหลักการทำงานที่อาศัยความแตกต่างของความดันย่อยของไอน้ำในอากาศและความดันไอของตัวทำละลายในเนื้อวัสดุอบแห้ง ความดันย่อยของตัวทำละลายในอากาศจะมีค่าน้อยกว่าความดันไอของตัวทำละลายในเนื้อวัสดุอบแห้ง ซึ่งมีผลทำให้เกิดแรงขับในการถ่ายโอนมวลสาร (driving force of mass transfer)

โดยการระเหยหรืออบแห้งที่สภาวะความกดอากาศต่ำกว่าความดันบรรยากาศห้อง คือ คุณสมบัติของสารที่ใช้ในการสกัด (extractor) กล่าวคือ เมื่อสภาวะความดันต่ำของเหลวจะสามารถเดือดได้ง่ายขึ้น ซึ่งมีผลทำให้สามารถระเหยได้โดยง่าย ใช้ความร้อนไม่สูง ดังตารางที่ 5 แสดงค่าความดันที่ทำให้น้ำและแอลกอฮอล์เดือด ณ อุณหภูมิต่างๆ จะเห็นว่า เมื่อความดันลดลง

เหลือ 74 mbar น้ำจะเดือดเพียงอุณหภูมิ 40 °C แต่ยาสมุนไพรทั่วไปมักจะสกัดโดยใช้น้ำผสมกับแอลกอฮอล์ ซึ่งในการอบแห้งจะต้องปรับค่าความกดอากาศให้สอดคล้องกับส่วนผสมของสารที่ใช้ในการอบแห้งนั้นๆ ด้วย

ตารางที่ 5 จุดเดือดของสารสกัด (°C) ที่ความดัน (mbar) ขนาดต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	20	30	40	50	60	80	100
น้ำ	23.4	42	74	123	199	474	1013
แอลกอฮอล์	59	105	180	296	470	1080	2270

1 mbar = 760.06 X 10^{-3} mm.Hg

ที่มา: นันทนา (2534)

ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเครื่องอบแห้งจะประกอบด้วย

(1) ตู้อบ (drying chamber)

(2) อุปกรณ์ที่ให้ใช้ความร้อน (heater)

(3) ปั๊มดูดอากาศ (suction pump)

(4) ชุดอุปกรณ์ควบคุมความดันและอุณหภูมิ

ระบบจะถูกทำให้ความดันที่สภาวะต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ด้วยปั๊มสุญญากาศ โดยจะดูดอากาศออกให้เหลือความกดอากาศไว้เพียง 0.03-0.06 bar ซึ่งสามารถทำให้น้ำเดือดได้ทันทีที่อุณหภูมิห้อง (25-35° C) ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดความแตกต่างของความดันของอากาศรอบนอกเนื้อวัสดุอบแห้ง ด้วยสภาวะดังกล่าวจะทำให้เกิดแรงขับในการถ่ายโอนมวลสาร (driving force of mass transfer) ระหว่างผิวของเนื้อวัสดุอบแห้งกับอากาศภายในตู้อบแห้ง นอกจากนี้เมื่อเนื้อวัสดุอบแห้งได้รับความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อน หรือความร้อนที่ได้จากแผ่นนำความร้อน (hot plate) จะทำให้วัสดุอบแห้งได้รับความร้อนโดยอาศัยหลักการพาความร้อนและการนำความร้อนตามลำดับ ซึ่งจะทำให้วัสดุอบแห้งให้มีความชื้นลดลงและสามารถกำจัดความชื้นลงได้ในระยะเวลาอันสั้น