

오일팜 EFB 섬유의 전처리 영향 평가

김동섭 · 성용주[†] · 김철환¹ · 김세빈²

접수일(2012년 12월 1일), 수정일(2012년 12월 17일), 채택일(2012년 12월 19일)

Effects of Pre-treatments on the Oil Palm EFB Fibers

Dong-Seop Kim, Yong Joo Sung[†], Chul-Hwan Kim¹ and Se-Bin Kim²

Received December 1, 2012; Received in revised form December 17, 2012; Accepted December 19, 2012

ABSTRACT

The empty fruit bunch fibers(EFB) of oil palm were examined for optimal utilization of the EFB fibers. The EFB fibers were obtained by shredding EFB, followed by removal of fines. The surface properties of the fibers were modified with various pre-treatments, such as hot water extraction, the soaking treatments with NaOH, ClO₂ and n-hexane. The changes in the fiber surface were examined with FT-IR method, which showed the changes in chemical compositions such as pectin, lignin, and etc. according to the pre-treatment methods. And the z-directional tensile testing of the fiber mold made of the treated EFB fibers showed the changes in the bonding strength by the pre-treatments. The fiber mold made of EFB fibers treated with ClO₂ showed the greater increase in the tensile energy absorption although the NaOH treatment resulted in the severer impact on the EFB fibers.

Keywords: Oil palm biomass, empty fruit bunch, pre-treatment, fiber mold, tensile energy absorption

1. 서론

전 세계적으로 지구 기후변화 대응 및 지속가능한 성장을 위한 바이오매스 및 목재 자원에 대한 관심과 수요는 지속적으로 증가하고 있다. 실제 국내외 산업

용, 에너지용 목질바이오매스 수요의 급등과 중국, 인도 등 신흥 개발국의 급속한 경제발전 및 일본과 같은 국가의 자연재해 복구 등으로 인해 목질기반 자원의 수요는 매년 늘어나고 있는 반면, 지구환경보존을 위한 천연림 보존으로 무분별한 벌채 제한 및 목질자원 부국의 자국 자원 보호정책 등으로 인해 목질자원의 공급은

• 충남대학교 농업생명과학대학 환경소재공학과 (Dept. of Biobased Materials, College of Agriculture and Life Science, Chungnam Natl. Univ. Daejeon, Republic of Korea)

1. 경상대학교 임산공학과 (Dept. of Forest Products, IALS, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea)

2. 충남대학교 농업생명과학대학 산림환경자원학과 (Dept. of Environment & Forest Resources, College of Agriculture and Life Science, Chungnam Natl. Univ., Daejeon, Republic of Korea)

† 교신저자(Corresponding author): E-mail: yosung17@cnu.ac.kr

상대적으로 제한이 커지고 있기 때문에 향후 안정된 목질자원 확보 및 수급은 점차 중요한 이슈가 되고 있다.

최근 점차 증가하는 목질자원 수요에 대응하고 부족한 목질자원을 대체하고자 다양한 비목질 바이오매스 자원에 대한 관심이 커지고 있는데, 특히 동남아 국가를 중심으로 상당한 양으로 발생하는 팜오일 제조공정의 부산물인 오일팜 바이오매스는 새로운 대체자원으로 관심의 대상이 되고 있다. 이러한 오일팜 바이오매스는 오일팜에서 팜오일 10 kg 생산 시 약 100 kg의 바이오매스가 부산물(EFB, Palm kernel Shell, POME)로 발생¹⁾되는 것으로 알려져 있는데 오일팜 산업의 성장과 함께 발생량이 늘어나는 오일팜 바이오매스의 활용에 대한 관심도 더욱 커지고 있는 실정이다.

43실제 전 세계 오일팜 조림면적은 2009년 기준으로 1492만 헥타아르로서 2005년의 1298만 헥타아르에 비해 약 14%가량 증가하였으며(FAO, STAT.), 오일팜 주요 생산국인 인도네시아의 오일팜 산업 증대 정책이 진행되고 있어 그 면적은 지속적으로 증가될 것으로 전망된다.

오일팜 산업의 부산물인 팜오일(CPO, Crude Palm Oil)가 식용 및 바이오디젤 등의 에너지자원으로써의 가치와 수요가 지속적으로 증가함에 따라 오일팜 생산량 또한 지속적으로 증가가 전망되고 이에 따른 오일팜 바이오매스 자원 또한 비례상승 할 것으로 판단된다. 실제 오일팜 부산물의 발생량은 팜오일의 직접적인 원료인 오일팜 열매뭉치(FFB, Fresh Fruit Bunch)생산량과 비교하여 예상할 수 있다. 말레이시아의 경우 국립 Malaysia Palm Oil Board (MPOB)에서 오일팜 재배면적 당 바이오매스 발생량을 예측하여 보고하였는데, 1 헥타아르의 오일팜 재배면적 당 기건 중량으로 FFB(Fresh Fruit Bunch)는 약 20 톤가량이 매년 발생되며 이중 열매를 제외한 EFB(Empty Fruit Bunch)가 4.4 톤, 열매 추출 후 발생하는 Mesocarp 섬유분이 2.7 톤, Palm Kernel Shell(PKS)이 1.1 톤 정도 발생¹⁾하는 것으로 추정되고 있다. 특히 가장 많은 양으로 발생되고 있는 EFB는 CPO 생산 공장에서 열매의 탈기 이후 발생하며, 공정상 증해로 전 처리되기 때문에 함유 수분량이 많으며, 약 1% 내외의 오일성분을 함유²⁾하고 있다. 이러한 EFB는 여러 가닥의 섬유상 뭉치로 이루어져 있고 정선작업을 통해 1~20 cm 내외의 천연섬유 형태로 얻을 수 있기 때문에 복잡한 공정을 거치지 않

아도 섬유자원으로써 활용 가능성³⁾이 높은 것으로 알려져 있다.

EFB는 팜유산업의 주요 셀룰로오스 폐기물로서 다 른 리그노셀룰로오스계 농업 부산물과 마찬가지로 평균 50 %이상의 셀룰로오스를 함유하고 있다. 그러나 실제 팜오일 공장에서는 매일 발생하는 EFB의 일부 보 일러의 원료로 활용하지만, 대부분 외부에 방치하거나 그대로 오일팜 농장의 멀칭 등의 저급 용도로 활용²⁾하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이러한 EFB의 섬유화를 통해 개별 섬유상으로 조성시킨 후, 기존의 건식 펄프 몰드 또는 섬유판 등의 섬유자원으로써의 활용가치를 증대하기 위한 방법을 모색하여 보았다. 이를 위해 화학적 전처리를 통한 섬유개질 및 특성 변화에 대한 기초자료를 확보하고자 침지 방식 등의 섬유 전처리를 적용하고, 처리된 EFB 섬유를 적용하여 열압성형 방식의 첨가제를 사용하지 않은 건식몰드를 제조하여 섬유간 결합 특성 등의 변화를 평가하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 공시 재료

인도네시아 오일팜 조림지내 CPO 공장에서 사출된 EFB 시료를 분양받아 본 실험에 활용하였다. 현장에서 분양받은 EFB를 함수율이 약 8%까지 건조하여 이송 및 보관하였다. EFB의 섬유화는 실험실용 건식 섬유해리기를 사용하여 Fig. 1과 같이 제조하였다. 제조된 EFB 섬유는 18 mesh와 60 mesh를 적용하여 미해리 부분과 미세분을 제거한 후 섬유분을 선별하여 공시재료로 사용하였다.

2.2 성분 분석

EFB의 공정 특성상 외부에 방치되기 때문에 시료 자



Fig. 1. Oil Palm EFB and shredded EFB fibers.

체에 모래 및 기타 이물질이 다량 포함되어 있다. 이러한 특성 때문에 분석 전 세척을 한 시료와 실시하지 않은 시료로 나누어 2가지 시료로 성분분석을 진행하였다. 전건된 시료를 분쇄기로 분쇄하여 40~100 mesh로 입자크기를 조절한 뒤, 환류냉각기를 통해 4시간 동안 열수추출량을 평가하였다. 비극성 용매에 대한 추출특성을 평가하기 위하여 알콜벤젠 1:2 혼합용매에서 6시간 동안 Soxhlet 추출(TAPPI Standard Method T204 cm-97)을 하였으며, 무기물 함량 조사를 위해 $525 \pm 25^\circ \text{C}$ 의 온도에서 4시간 동안 연소시켜 Ash의 함량(TAPPI Standard Method T211-om-02)을 측정하였다. 리그닌 함량은 Klason Lignin 측정법(TAPPI Standard Method T222-om-98)에 의해 측정하였다. 또한, holo-cellulose 및 α , β , γ -cellulose의 함량은 TAPPI Standard Method T203 cm-99에 의해 측정하였다.

2.3 EFB 섬유 전처리

본 실험에서는 Table 1에서와 같이 화학적 전처리와 열수처리에 의해 EFB 섬유개질을 실시하였다. 세 가지의 용액을 이용하여 침지를 진행하였으며 침지시간은 12시간, 액비는 10:1로 동일한 조건을 부여하였으며, 열수추출은 환류냉각기를 통해 4시간 추출하였다. 세척된 섬유를 비교분으로 하여 NaOH는 표면의 리그닌을 제거하고 섬유 표면의 기름성분을 제거하여 수산기를 활성화하기 위해 적용하였으며, ClO_2 는 섬유의 표백을 통해 표면의 리그닌과 기름성분을 제거하기 위하여 적용하였고, n-Hexane 처리는 잔류 오일성분의 제거를 위한 처리로서 적용하였다.

2.4 표면반사적외선 분광기 분석 (FT-IR for Surface Chemistry of Real Specimens)

침지 이후 섬유 표면의 화학적 변화를 조사하기 위해

표면반사적외선 분광기(FT-IR for Surface Chemistry of Real Specimens) 적용하여 표면특성에 대한 분석을 실시하였으며, ATR(Attenuated Total Reflectance)의 표면분광을 통해 발생하는 peak의 해석을 통해 섬유표면에서 발생된 화학적 변화를 분석하였다.

2.5 주사전자현미경 분석 (Scanning Electron Microscope)

오일팜 EFB 섬유의 기본적인 해부학적 구조 및 침지 이후 각 섬유의 표면이 어떠한 변화가 있는지 관찰하기 위하여 주사전자 현미경을 통하여 표면 구조를 촬영하였다. 침지 처리 섬유는 NaOH 2.5% 용액에서 12시간 침지한 섬유로써 표면의 기름 성분 및 이물질을 제거하기 위해 실행하였다.

2.6 건식몰드 제조

EFB 섬유의 전처리 등에 의한 섬유간 결합특성 및 기계적 특성의 변화 등을 평가하기 위하여 각각의 처리된 EFB 섬유를 함유수분 5% 내외로 건조하고 전건 중량 15 g을 기준으로 시료를 채취하여 실험실용 건식몰드기를 적용하여 건식몰드를 제조하였다. 이때 추가적인 접착제 및 첨가제 등을 적용하지 않고 압력 50 kg/cm^2 , 온도 140°C 의 조건에서 20 분간 열압성형을 하여 $5 \times 5 \text{ cm}$ 의 규격의 건식몰드를 제조하여 그 특성을 비교평가 하였다.

2.7 건식몰드 특성 분석

제조된 건식몰드의 두께 및 전건 중량을 측정하여 건식몰드의 밀도를 측정하였다. 또한 KS F 2277에 의한 건식몰드 표면 박리 강도 측정방법을 적용하여 섬유간 접착력을 시험하여 Z-direction 분리강도 평가를 실시하였다. 산출된 Z-direction 분리강도와 신장률을 이용하여 Apparent Tensile Energy Area를 산정하였다.

Table 1. Pre-treatment conditions for EFB fibers

	Solvent		
	NaOH	ClO_2	n-Hexane
Concentration (%)	6	1	98
Soaking Time (hr)		12	
Liquid ratio	10:1		

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 성분 분석 결과

본 실험에서는 EFB의 활용 전에 물로 세척하는 경우와 미세척하는 경우에서의 EFB 섬유 특성의 변화를 비

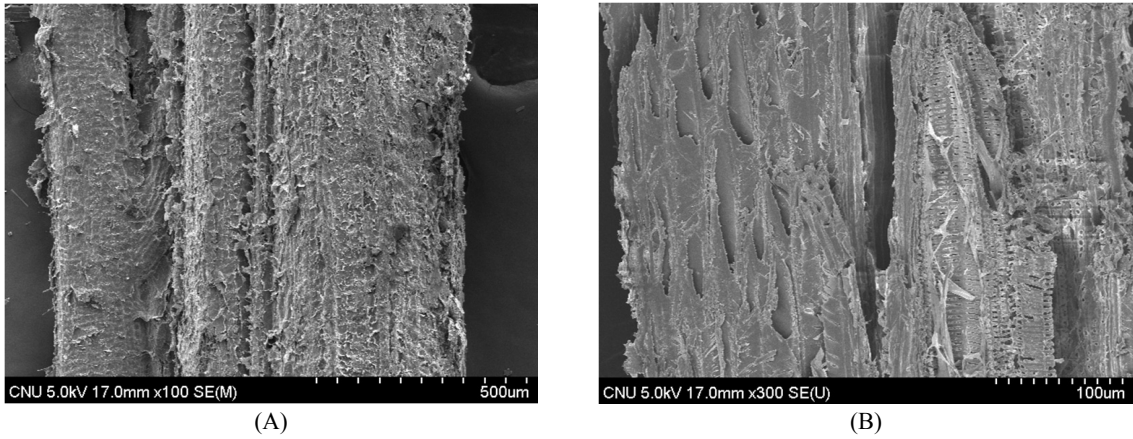
Table 2. Chemical compositions of EFB fibers before and after washing treatment

	Ash	Hot Water Extract	Alcohol-be nzene extract	Klason Lignin	Holo-Cellulose			
					Holo Cellulose	α -Cellulose	β -Cellulose	γ -Cellulose
After Washing	4.75	9.67	0.98	18.01	66.93	59.98	5.30	35.58
Before Washing	12.79	13.37	2.38	19.49	52.64	61.96	6.67	29.52

교 평가하였다. Table 2에 정리된 바와 같이 미세척 시료의 경우 부산물의 야적/방치에 따라 모래 등의 이물질이 다량 포함되기 때문에 높은 Ash 함량을 나타내는 것을 알 수 있다. 세척 후 시료에서 열수추출량과 유기용매 추출량이 감소하는 것을 확인할 수 있는데 세척을

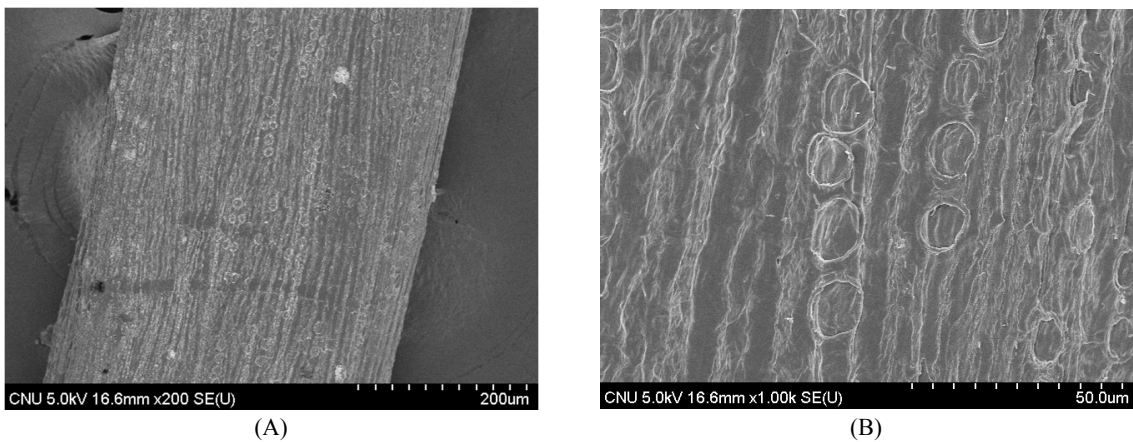
통해 섬유 표면의 다양한 유기 오염물질 등이 제거되는 것을 알 수 있었다.

EFB내의 리그린 함량은 대체적으로 목재보다 낮은 것으로 분석되었으며 이로써 섬유화를 진행할 시 좀 더 완화된 조건에서의 섬유화 가능성이 있을 것으로 판단



(A : EFB fiber surface, B : Cross section of EFB fiber)

Fig. 2. SEM Images of untreated EFB fibers.



(A : $\times 200$ magnification, B : $\times 10,000$ magnification)

Fig. 3. SEM Image of EFB Fiber soaked with 2.5 % NaOH.

되었다. 대체로 60%이상의 높은 홀로셀룰로오스 함량을 지니고, 그 중 60% 가량의 α-셀룰로오스를 포함하여 목질자원과 유사한 수준의 셀룰로오스 함량을 가지고 있는 것을 알 수 있었다.

3.2 EFB의 형태적 특성 평가

EFB 섬유는 전자현미경으로 관찰한 결과는 Fig. 2와 같다. EFB 섬유는 여러 미세섬유의 다발로 형성되어 있으며, 각 미세섬유간 막공이 존재하고, 각각의 미세섬유는 내부에 세포내강이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 또, 섬유의 표면에는 세척을 실시한 이후에도 많은 미세섬유 및 이물질들이 잔류하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 오일팜 열매에서 나오는 오일 성분이 고형화 되었거나, 야적으로 인한 먼지, 모래 등의 이물질들^{2,3)}이 고착되어있는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 NaOH 침지 처리 이후의 섬유표면인데, 섬유 길이방향으로의 미세섬유 배열과 섬유간 막공 등이 섬유표면에서 관찰되었다.

3.3 FT-IR 섬유 표면 측정 결과

전처리 전후의 EFB 섬유의 표면의 화학적 특성을 FT-IR로 분석한 결과는 Fig. 4와 같다. 전처리 시료와 미처리 시료 모두 900~1740 cm⁻¹ 파장(C-OH)과 2800~3400 cm⁻¹(O-H) 파장에서 강한 피크⁴⁾가 나타

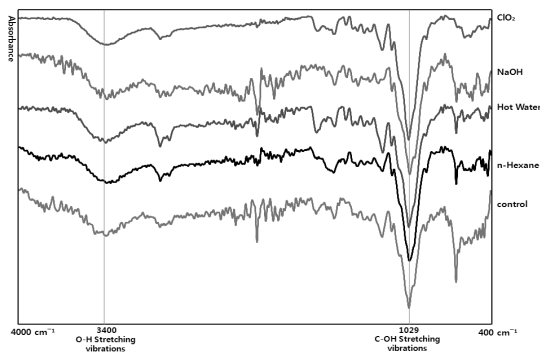


Fig. 4. FT-IR Spectra(400~4000cm⁻¹) of the non-treated/pre-treated EFB fibers.

나는 것을 알 수 있다. 파장 3400 cm⁻¹에서 나타나는 피크는 O-H기에 의한 결과로써 전처리에 따라 큰 차이점⁵⁾은 발생하지 않았다. 1420cm⁻¹, 1460cm⁻¹, 1510cm⁻¹ 파장은 리그닌 유형별 파장을 나타내는데, 이는 전처리에 의하여 리그닌 변형이 미세하게 발생⁶⁾됨에 따라 서로 다른 형태를 나타내는 것으로 판단된다. Fig. 5에서 자세히 보이듯이 1650cm⁻¹ 피크는 Amide I에 의해 나타나는 것으로써 탄수화물의 C=O 결합으로부터 발생되며, n-Hexane 침지처리 시료에서 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 1736cm⁻¹ 파장에서 나타나는 피크는 카르보닐 그룹으로, 펙틴과 리그닌, 미복합 케톤에 의해 발생하는 밴드로써 EFB의 리그닌 구조를 나타내는 것으로 볼 수 있다.¹¹⁾ C=O 결합의 파장 변화를 통해 NaOH 전처리에서 가장 크게 리그닌의 구조가 파괴됨을 알 수 있으며, n-Hexane의 처리에서는 상대적으로 피크가 감소⁷⁾하는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 건식물드 특성 분석 결과

제조된 건식물드의 밀도는 Table 3에서 나타난 바와 같이 대체적으로 약 6 ± 0.5 g/cm³으로 전처리에 의해 시료간 큰 차이를 나타내지 않았다. 다만 NaOH 침지 처리한 섬유의 표면 및 내부 리그닌의 분해로 미세섬유화의 진행 정도가 가장 높아 밀도가 다른 조건보다 소

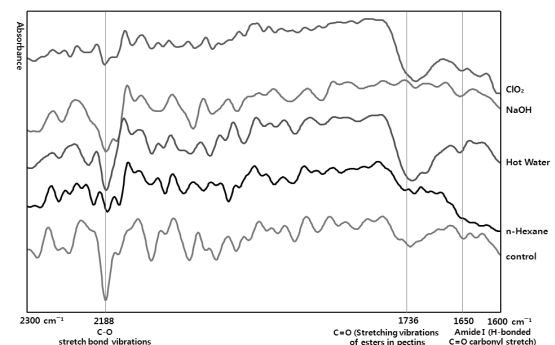


Fig. 5. FT-IR Spectra(1600~2300cm⁻¹) of the non-treated/pre-treated EFB fibers.⁹⁾

Table 3. Density of molds manufactured with the pre-treated EFB fibers

Pre-treated Methods	Control	ClO ₂	NaOH	Hot water Extract	Hexane
Density (g/cm ³)	5.91	6.00	6.02	5.98	5.96

량 증가한 경향을 나타내었다.

각각의 건식몰드 샘플의 섬유간 결합특성을 평가하기 위하여 z-방향 인장강도를 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. 실험결과에서 알 수 있듯이 미처리한 EFB 섬유로 제조된 건식몰드 시료의 경우 가장 높은 최대 z-인장강도를 보여주었다. 이는 미처리 EFB 섬유유의 경우 섬유 표면에 리그닌 등이 그대로 남아있기 때문에 섬유간 순간 접착력이 가장 높게 발현된 것으로 판단된다. 다양한 섬유 전처리를 실시한 경우 처리조건에 따라 섬유자체 강도 저하 및 섬유표면 리그닌의 감소 등이 발생됨에 따라 최대 강도가 낮아지는데 이와는 달리 z-방향으로의 신장율은 전처리에 따라 대체적으로 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 리그닌 및 펙틴 성분 등의 제거에 따라 EFB 섬유자체의 섬유 유연성이 증가되고 이에 따라 섬유의 결합형태의 변화가 발생됨에 따른 영향으로 판단된다. NaOH 전처리의 경우 건식몰드 섬유제품에서 오히려 신장률이 감소하였는데, 이는 전처리 조건이 매우 강하여 섬유 표면의 미세분 및 이물질이 모두 제거되고, 섬유자체 강도 또한 감소됨에 따라 나타나는 결과라고 판단된다. 한편 ClO₂ 처리한 경우 최대 강도는 감소하였으나, 신장률이 매우 증가하는 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다.

최대 박리강도 및 신장률을 고려하여 산출한 Apparent tensile energy absorption을 Fig. 7에 나타내었다. ClO₂로 전처리한 섬유로 제조된 건식몰드의 경우에는 전체적인 섬유간 인장파괴가 발생하기 위해 가장 많은 에너지가 소요되었음을 알 수 있었다. 이는 전처리로 인해 EFB 섬유의 유연성이 증가함에 따라 섬유가 상호간 유연하게 넓은 면적으로 결합되어 파괴하중이 가해질 때, 시편의 유연함에 의해 많은 에너지를 흡수하였

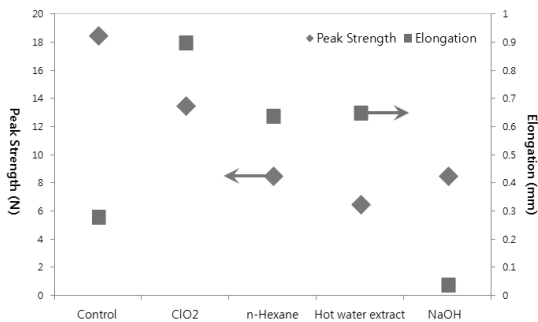


Fig. 6. Maximum peak strength and elongation of non-treat/pre-treated EFB fibers.

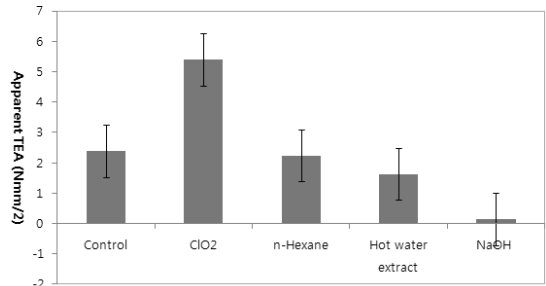


Fig. 7. Apparent tensile energy of non-treat/pre-treated EFB fibers.

다는 것으로 판단된다. NaOH 전처리 시편의 경우 강한 전처리 조건에 의해 섬유 자체의 강도가 저하되어 오히려 유연성이 감소하고 Apparent TEA가 감소한 것으로 판단된다.

이러한 결과를 종합하여 보았을 때, 전처리에 의해 섬유개질이 진행되었으나, 화학적 전처리를 통해서 밀도의 변화 없이 섬유 자체 강도를 하락시키는 부분에서 최대 박리강도는 감소하지만, 적절한 전처리 조건을 적용하였을 때 섬유 자체의 유연성 등의 향상을 통한 신장률의 증가가 이루어지는 것으로 판단된다. 다양한 섬유 전처리에 의한 EFB 섬유자체 특성의 변화 및 이에 따른 몰드 특성의 변화 등에 대한 정확한 기작과 원리를 알아보기 위해서는 향후 보다 정밀한 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 보이지만 본 연구결과에서 알 수 있듯이 이러한 전처리를 통한 EFB 섬유개질을 통해 건식몰드 등의 소재특성의 조절이 가능할 것으로 판단되었다.

4. 결론

EFB 섬유는 미세섬유 다발로 이루어진 리그노셀룰로오스성 바이오매스 자원으로써 목질섬유 대체자원 및 셀룰로오스 자원으로써 많은 관심의 대상이 되고 있다. EFB는 기계적 해리에 의해 섬유상의 원료로 전환이 가능하여 다양한 용도로 쉽게 적용될 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 다양한 전처리 공정의 적용을 통해 EFB 섬유 표면의 화학적 성질이 변화시키고 이에 따른 섬유특성의 변화를 평가하였다.

천연적으로 다발형 섬유형태를 띠는 EFB 섬유의 경우 화학전처리를 통해 EFB 섬유 특성의 변화를 가져

을 수 있고 이에 따라 EFB 섬유를 기반으로 제조된 몰드제품의 품질 또한 크게 변화되는 것으로 알 수 있었다. 특히, 알칼리 처리 등에 의한 처리는 EFB 섬유기반 건식몰드의 기계적 특성을 저하시키지만 ClO_2 등의 전처리를 통하여 섬유간 결합특성의 변화로 인한 몰드의 신장율이 증대됨을 확인할 수 있었다. EFB 섬유를 활용한 몰드의 강성과 신장율의 변화는 전처리방법에 따라 크게 다르게 나타남에 따라 EFB 섬유특성의 변화 및 그 자세한 영향 등에 대한 깊이 있는 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 판단되었다. 향후 EFB 섬유자체의 특성의 변화에 대한 추가적인 연구가 향후 이루어진다면 EFB 섬유를 기반으로 한 다양한 섬유소재의 개발 및 개질 등이 가능하여 EFB 섬유의 활용도는 더욱 높아질 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 산림청 ‘산림과학기술개발사업(과제번호: S111212L070100)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

인용문헌

1. Chan, K.W. Biomass production in the oil palm industry. In *Oil Palm and the environment-A Malaysian Perspective*. Malaysian Oil Palm Grower's Council, (1999).
2. Law, K.-N., Daud, W.R.W. and Ghazali, A., Morphological and Chemical Nature of Fiber Strands of Oil Palm Empty Fruit Bunch, *Bioresources*, 2(3):351-362 (2007).
3. Sreekala, M.S., Kumaran I, M.G., Thomas, S., Oil Palm Fibers: Morphology, Chemical Composition, Surface Modification, and Mechanical Properties, *Journal of Applied Polymer Science*, 66(5):821-835 (1997).
4. Tan, I.A.W., Hameed, B.H. and Ahmad, A.L., Equilibrium and kinetic studies on basic dye adsorption by oil palm fibre activated carbon, *Chemical Engineering Journal*, 127:111-119 (2007).
5. Rozman, H.D., Saad, M.J and Mohd Ishak, Z.A., Flexural and impact properties of oil palm empty fruit bunch (EFB) - polypropylene composites - the effect of maleic anhydride chemical modification of EFB, *Polymer Testing*, 22:335-341 (2003).
6. Baharuddin, A.S., Rahman, N.A.A., Shah, U.K.M., Hassan, M.A., Wakisaka, M. and Shirai, Y., Evaluation of pressed shredded empty fruit bunch (EFB)-palm oil mill effluent (POME) anaerobic sludge based compost using Fourier transform infrared (FTIR) and nuclear magnetic resonance (NMR) analysis, *African Journal of Biotechnology*, 10(41):8082-8089 (2011).
7. Grube, M., Linb, J.G., Leeb, P.H. and Kokorevichac, S., Evaluation of sewage sludge-based compost by FT-IR spectroscopy, *Geoderma*, 130(3-4):324 - 333 (2006).
8. Abdul Khalil, H.P.S., Nurul Fazita, M.R., Jawaid, M., Bhat, A.H. and Abdullah, C.K., Empty Fruit Bunches as a Reinforcement in Laminated Bio-composites, *Journal of Composite Materials*, 45(2):219-236 (2011).
9. Escalona Platerol, E., Peñarroya Mentrut, M., Otero Areán, C. and Zecchina, A., FTIR Studies on the Acidity of Sulfated Zirconia Prepared by Thermolysis of Zirconium Sulfate, *Journal of Catalysis*, 162(2):268 - 276 (1996).
10. Jawaid, M., Abdul Khalil, H.P.S., Noorunnisa Khanam, P. and Abu Bakar, A., Hybrid Composites Made from Oil Palm Empty Fruit Bunches/Jute Fibres: Water Absorption, Thickness Swelling and Density Behaviour, *Journal of Polymers and the Environment*, 19(1):106-109 (2011).
11. Ahmadzadeh, A. and Zakaria, S., Preparation of Novolak Resin by Liquefaction of Oil Palm Empty Fruit Bunches (EFB) and Characterization of EFB Residue, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 48(1):10-16 (2008).